

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS DE HAUTE PERFORMANCE PRÉPARÉS AVEC DES GRANULATS RECYCLÉS

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Mohammed NESMENE

Jury: Ammar Yahia (Directeur)
Arezki Tagnit-Hamou (Rapporteur)
Brahim Tighiouart (Evaluateur)

À ma mère, à mon père

*Je dédie ce modeste travail à mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie. A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : ma conjointe Asmaa BENARBIA, et bien sûr à mes frères et sœur, sans oublier mes beaux-parents que j'aime.
A toute ma famille, mes collègues et mes amis,
Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis
merci.*

Mohammed NESMENE

RÉSUMÉ

Les bétons aux granulats recyclés (GR) offrent aujourd'hui une véritable alternative technique, écologique et économique dans plusieurs applications. Cependant, ces bétons doivent répondre aux mêmes règles de qualité que les bétons aux granulats naturels, quant à leurs performances mécaniques, physiques, et leurs modes d'utilisation. Cette étude consiste à analyser les propriétés des bétons autoplaçants (BAP) de haute performance destinés aux applications de réparation dans lesquelles une partie des gros granulats naturels (GN) et sable naturel (SN) est remplacée par des granulats recyclés de classe MR-2 ($\phi = 0-20$ mm). Elle consiste principalement en l'analyse des impacts des taux de remplacement des granulats recyclés, l'état de saturation de GR, la fraction fine de granulats recyclés et le type de liant, sur le comportement des BAP à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité. Deux différentes fractions de granulats recyclés de classe MR-2, le sable recyclé de taille inférieure à cinq millimètres et des gros granulats de MR-2 de diamètre entre cinq et vingt millimètres, sont étudiés. Les essais de caractérisation des granulats recyclés, telles que la densité, l'absorption, la vitesse d'absorption et la granulométrie sont effectués lors de la première phase de cette étude.

Dans le cadre de cette étude, on vise la formulation d'un béton autoplaçant de haute performance aux granulats recyclés (0-20 mm). La formulation du BAP étudié est proportionnée avec un rapport E/C de 0,35 et une teneur en air de 5 à 8 %. Les bétons sont formulés en utilisant des courbes granulométriques optimisées à l'aide de la courbe de Fuller-Thompson. Deux liants ternaires, le TerC³ à base de cendres volantes et de fumée de silice et le Tercem3000 à base de laitier et de fumée de silice sont utilisés. Le remplacement des granulats naturels et sable naturel par les deux fractions des granulats recyclés MR-2 est effectué de la manière suivante : une proportion des granulats fins recyclés remplace le sable et une partie des gros granulats recyclés remplace les gros granulats naturels. L'optimisation granulaire des mélanges est déterminée par rapport à la courbe visée de Fuller et Thompson [Gagné et Aïtcin, 2014]. Les essais réalisés sur le BAP de haute performance se résument essentiellement en trois phases :

- 1) Des essais sur BAP à l'état frais pour étudier l'ouvrabilité et le comportement rhéologique des BAP à faible rapport (E/C), en montrant l'influence du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés, l'état de saturation des granulats recyclés et l'effet de la fraction fine de granulat recyclé ;
- 2) L'étude paramétrique sur les BAP durcis, la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance en flexion et le module d'élasticité ainsi que les propriétés de durabilité, notamment, la perméabilité aux ions chlorures, résistivité électrique, le retrait de séchage, le retrait endogène et la résistance au gel-dégel ont été évaluées pour les mélanges des BAP confectionnés ;
- 3) L'essai de fluage par compression et la résistance à l'écaillage ont été évaluées pour les mélanges optimisés.

Il s'agit d'identifier l'effet des granulats recyclés de type MR-2 saturés sur le comportement des BAP, notamment l'effet sur le mûrissement interne et la réduction du retrait endogène des bétons ayant un rapport E/C faible. L'influence du mortier résiduel sur la cure interne du béton est également étudiée. Une formulation de BAP contenant les GR saturés 24 heures à l'eau avant bétonnage et une autre formulation en utilisant les MR à l'état sec est retenue pour déterminer l'effet de mûrissement interne.

Les résultats obtenus montrent que les bétons formulés avec des granulats recyclés donnent des résultats mécaniques plus faibles par rapport aux bétons de référence, notamment des bétons élaborés avec les MR saturés. Ceci peut être probablement dû au relâchement de l'eau pendant le mûrissement de béton. Ainsi, il est évident que l'utilisation des granulats recyclés saturés ont un effet négatif sur les propriétés mécaniques. Par contre, les bétons aux granulats recyclés totalement saturés muris à l'air donnent des résistances mécaniques supérieures aux BAP fabriqués avec les MR à l'état sec. Par ailleurs, l'utilisation de granulats recyclés, notamment les particules fines (sable de MR), totalement saturés dans les BAP à faible rapport E/C a un effet bénéfique sur la réduction du retrait endogène et de séchage.

Mots-clés : Bétons autoplaçants, système ternaire, durabilité, granulats recyclés, fraction de MR-2, méthode des volumes absolus, optimisation des granulats, retrait endogène.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur le professeur Ammar Yahia pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces recherches en acceptant d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par leurs propositions. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES SYMBOLES	xii
LISTE DES ACRONYMES	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Objectifs de l'étude.....	2
1.3 Structure de mémoire.....	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
2.1 Introduction	4
2.2 Granulats recyclés.....	4
2.3 Classification des granulats recyclés	7
2.4 Propriétés physiques	8
2.4.1 Granulométrie des granulats recyclés	8
2.4.2 Masse volumique.....	9
2.4.3 Mortier résiduel	9
2.4.4 Zone de transition à l'interface granulat/pâte.....	13
2.4.5 Absorption et vitesse d'absorption des granulats recyclés.....	13
2.4.6 Séquence de malaxage des bétons aux granulats recyclés	19
2.5 Propriétés du béton à base de granulats recyclés.....	20
2.6 Retrait du béton	27
2.6.1 Retrait plastique.....	28
2.6.2 Retrait thermique.....	28
2.6.3 Retrait de séchage.....	28
2.6.4 Retrait endogène.....	29
2.6.5 Retrait total	33
2.7 Mûrissement	33
2.7.1 Durée de la cure.....	33
2.7.2 Mûrissement interne.....	34
2.8 Béton autoplaçant	36
2.8.1 Approches de formulation	37
2.9 Qualité d'adhérence des bétons de réparation	39
CHAPITRE 3 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS	40
3.1 Programme expérimental.....	40
3.2 Normes utilisées :	44
3.3 Matériaux utilisés	45
3.2.1 Ciment	45
3.2.2 Les granulats naturels.....	45
3.2.3 Granulats recyclés	48
3.2.4 Adjuvants	52
3.2.5 Eau de gâchage.....	52

3.3	Procédures expérimentales sur les bétons autoplaçants	52
3.3.1	Formulations des BAP et calculs des formulations de BAP aux GR.....	52
3.3.2	Optimisation granulaire de différents taux de remplacement	54
3.3.3	Séquence de malaxage	56
3.3.4	Préparation des granulats recyclés	57
3.4	Description des procédures d'essais	59
3.4.1	Analyse granulométrique, densité et absorption	59
3.4.2	Caractérisation des propriétés rhéologiques et mécaniques	60
3.4.3	Essais de la durabilité des BAP.....	65
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	71
4.1	Phase I – Essais sur granulats	71
4.1.1	Caractérisation des matériaux utilisés	71
4.2	Phase II - Étude paramétrique sur un béton autoplaçant	80
4.2.2	Formulations et propriétés des BAP étudiés	83
4.2.3	Préparation des matériaux et production des bétons autoplaçants	84
4.2.4	Séquence de malaxage	85
4.2.5	Résultats à l'état frais	86
4.2.6	Propriétés mécaniques.....	89
4.2.7	La durabilité	100
4.3	Phase III - Effet de l'état de saturation des GR et du type de liant sur l'ouvrabilité, propriétés mécaniques et durabilité.....	111
4.3.1	Résultats à l'état frais	111
4.3.2	Propriétés mécaniques	115
4.3.3	Durabilité.....	118
4.3.4	Mûrissement à l'air.....	121
4.4	Phase IV - Effet de fractions fines recyclées sur les propriétés du BAP	123
4.4.1	Résultats à l'état frais	124
4.4.2	Propriétés mécaniques.....	125
4.4.3	Durabilité.....	128
CHAPITRE 5	ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	133
5.1	Caractérisation	133
5.1.1	Analyse granulométrique	133
5.1.2	Densité et absorption	135
5.1.3	Cinétique d'absorption	135
5.2	Essais sur le béton.....	135
5.2.1	Analyse du comportement de béton autoplaçant à l'état frais	135
5.2.2	Analyse des propriétés mécaniques.....	137
5.2.3	Analyses de la durabilité	142
CHAPITRE 6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	148
6.1	Conclusions	148
6.2	Recommandations	150
ANNEXE A – DONNÉES.....		151
LISTE DES RÉFÉRENCES		165

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Déchets affectant l'environnement [Thiery <i>et al.</i> , 2005].....	5
Figure 2 : Déchets de démolition [Fabrigat, 2012]	5
Figure 3 : Analyse granulométrique des matériaux recyclés [Moniz <i>et al.</i> , 2013]	9
Figure 4 : Formes des granulats recyclés [Douara <i>et al.</i> , 2009].....	10
Figure 5 : Différentes phases qui composent un granulat recyclé [Fantous, 2015]	11
Figure 6 : Présentation schématique de la séparation du mortier résiduel	13
Figure 7 : Pourcentage d'adjuvant utilisé en fonction du pourcentage de substitution SR afin de maintenir un étalement de 280 mm à l'instant initial (T_0) [Z. Tahar, 2015]......	15
Figure 8 : Evolution de l'étalement à T_{90} en fonction du pourcentage de SR pour les 4 configurations [Z. Tahar, 2015]	15
Figure 9 : Comparaison de la vitesse d'absorption du MR-2 avec un granulat naturel [Boulay, 2014].....	16
Figure 10 : Cinétique d'absorption des GGR [Turcanu, 2017]	17
Figure 11 : Cinétique de l'absorption des granulats recyclés traités / granulats recyclés non traités par la carbonatation [Thiery <i>et al.</i> , 2011].....	18
Figure 12 : Influence du procédé de carbonatation sur la cinétique d'absorption des granulats recyclés [Thiery <i>et al.</i> , 2011]	18
Figure 13 : Colmatage global de la microstructure (abaissement de la porosité) des granulats recyclés traités / granulats recyclés non traités [Thiery <i>et al.</i> , 2011]	19
Figure 14 : Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 [Boulay, 2014]	22
Figure 15 : Résistance à la compression à 28 jours [Maftah <i>et al.</i> , 2011]	25
Figure 16 : Résistance à la traction par fendage à 28 jours [Maftah <i>et al.</i> , 2011].....	25
Figure 17 : Fractures topographiques des bétons aux GR [Braymand, 2013]	27
Figure 18 : Principaux types de retrait du béton. [Piécard et Dieryck, 2004]	28
Figure 19 : Évolution du retrait endogène en fonction de E/C ($\mu\text{m/m}$) [Tazawa et Miyazawa, 1997 ; Piécard et Dieryck, 2004].....	30
Figure 20 : Mesure linéique du retrait endogène avec la corde vibrante	31
Figure 21 : Éprouvettes recouvertes de peinture époxy / Déformètre [Wolters, 2010]	32
Figure 22 : Éprouvettes sous film d'aluminium [Wolters, 2010]	32
Figure 23 : Cure à l'eau et cure interne utilisant un GL saturé dans le transport de l'eau vers la pâte de ciment [Bédard, 2016]	35
Figure 24 : Constituants des bétons ordinaires et des BAP [Association béton Québec, Luc Bédard, 2016].....	37
Figure 25 : Différentes catégories d'essais mécaniques pour évaluer l'adhérence [Modjabi-Sangnier, 2010]	39
Figure 26 : Organigramme des phases expérimentales	44
Figure 27 : Courbe granulométrique du sable naturel (0-5 mm).....	46
Figure 28 : Courbe granulométrique du gros granulat 5-14 mm.....	47
Figure 29 : Courbe granulométrique du gros granulat naturel de diamètre 10 mm	48
Figure 30 : Classification québécoise des MR (NQ 2560-600) [Moniz, 2012]	49
Figure 31 : Les GR de classe MR-2 avant tamisage et les fractions après tamisage	50
Figure 32 : Asphalte et granulat recyclé enrobé par l'asphalte	51
Figure 33 : Fraction de granulat recyclé de MR-2 supérieure à 20 mm.....	51
Figure 34 : Formulations des BAP étudiés.....	54

Figure 35 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, Mélange Témoin 100% MR-2	55
Figure 36 : Tableau d'optimisation granulaire à l'aide du « Excel » Mélange Témoin 100% GN, (20%, 35%, 50%) MR-2, 17,5% GMR-2 et 17,5% SMR-2	55
Figure 37 : Séquences de malaxage, en deux étapes, utilisée pour la production des bétons ...	57
Figure 38 : Granulat MR-2 à l'état SSH (saturé surface humide).....	58
Figure 39 : Les états possibles des granulats poreux [Aadil-Laabous, 2014]	59
Figure 40 : Montage d'un essai de fluage en compression	63
Figure 41 : Demi-cylindre dans un moule de 100 x 200 mm.....	64
Figure 42 : Essais de traction par fendage sur un cylindre bicouches moulées / principe	64
Figure 43 : PGI Rcon mètre pour la résistivité électrique du béton.....	65
Figure 44 : Poutre sous un film d'aluminium et la méthode de mesure du retrait endogène avec les plots.....	68
Figure 45 : Corde vibrante installée dans une poutre de 100x100x400 mm.....	69
Figure 46 : Poutre de béton emballée dans un film d'aluminium autocollant	69
Figure 47 : Cylindres de 100 x 200 mm mûris à l'air de laboratoire température de 21°C et humidité relative de $50 \pm 4\%$)	70
Figure 48 : Échantillonnage de MR-2 par la méthode de quartage.....	71
Figure 49 : Granulats recyclés MR-2 (0 - 31,5 mm) tamisés	72
Figure 50 : Granulats recyclés MR-2 (5-20 mm).....	73
Figure 51 : Courbe granulométrique des granulats recyclés de classe MR-2 (5-20 mm).....	74
Figure 52 : Courbe granulométrique du sable recyclé de MR-2	75
Figure 53 : Fractions sable MR-2.....	76
Figure 54 : Pesée hydrostatique [Djerbi Tegguer, 2012 ; Turcanu, 2016 ; Jennifer, 2016].....	78
Figure 55 : Vitesse d'absorption des SMR-2, GMR-2 et MR-2 en fonction du temps.....	79
Figure 56 : Cinétique d'absorption des SMR-2, GMR-2 et GN	80
Figure 57 : Optimisation granulométrique des matériaux pour la production du BAP	81
Figure 58 : Optimisation granulométrique des matériaux pour la production du BAP (17,5% SMR-2 et 17,5% GMR-2)	82
Figure 59 : Pré-saturation et l'état des granulats recyclés avant la confection des bétons	84
Figure 60 : Granulats recyclés lors de la correction de la teneur en eau	85
Figure 61 : Séquence de malaxage en deux étapes	85
Figure 62 : Masses volumiques des BAP étudiés	86
Figure 63 : Teneur en SP pour des bétons étudiés avec GR saturés ($E/L=0,35$)	87
Figure 64 : Essais de l'étalement des BAP étudiés	89
Figure 65 : Résultats de l'étalement et le J-ring des bétons étudiés.....	89
Figure 66 : Gain des Résistances à la compression des BAP contenant différentes teneurs en de granulats recyclés de classe MR-2	91
Figure 67 : Gain des Résistances à la traction par fendage des BAP contenant différentes teneurs de GR de classe MR-2.....	92
Figure 68 : Coupe longitudinale sur un demi-cylindre soumis à un essai de traction par fendage	93
Figure 69 : Gain des Résistances en flexion des bétons étudiés	94
Figure 70 : Poutre de (100x100x400 mm) lors l'essai de flexion.....	94
Figure 71 : Module d'élasticité E des bétons étudiés à 28,56 et 91 jours	95
Figure 72 : Fluage de dessiccation ε ($\mu\text{m/m}$) en fonction de la durée de chargement – Chargement de 28 jours jusqu'à 91 jours pour deux bétons (100% GN et 35% MR-2 saturé).....	96

Figure 73 : $\varepsilon = 1E + FK\ln(t + 1)$ Chargement à 91 jours de BAP-T et BAP 35% MR-2 S...	97
Figure 74 : Résistance à la traction des bétons réparés [témoin et 35 %MR-2 (0-20 mm)]	98
Figure 75 : Cylindre 100x200 mm après un essai de compression	99
Figure 76 : Cylindre 100 x 200 mm avant et après un essai de traction par fendage	99
Figure 77 : Résistivité électrique des bétons étudiés à l'âge de 28, 56 et 91 jours	101
Figure 78 : Perméabilité aux ions chlorure des bétons étudiés	102
Figure 79 : La perméabilité aux ions chlorure à 56 jours et la résistivité à 28 jours en fonction du taux de remplacement des GR (0-20 mm)	103
Figure 80 : Facteur de durabilité $(V_t/V_0)^2$ (%) des bétons aux GR (0-20 mm) après 300 cycles de gel-dégel	104
Figure 81 : Éprouvette de BAP contenant 35% MR-2 soumise à un essai d'écaillage	106
Figure 82 : Éprouvette de BAP témoin (0% GR) soumise à un essai d'écaillage	106
Figure 83 : Résultats du retrait endogène des bétons étudiés (BAP de référence et des BAP 35% MR-2 saturé)	107
Figure 84 : Écart du retrait endogène des BAP 35% MR-2 par rapport aux BAP témoin	108
Figure 85 : Retrait endogène des BAP 35% MR-2 saturés en utilisant la corde vibrante	109
Figure 86 : Retraits de séchage des bétons étudiés (BAP – T, BAP 35% MR-2 (0-20 mm) en fonction du temps, cure à une humide relative de $50 \pm 4\%$	110
Figure 87 : Résultat du retrait total des bétons étudiés	111
Figure 88 : Masses volumiques des bétons frais, BAP (35% de MR-2 sec, 35% de MR-2 saturé) avec TerC ³ et 35% de MR-2 avec le Tercem3000	112
Figure 89 : Teneur en SP pour les bétons étudiés	113
Figure 90 : Etalement comparés par J-Ring des bétons étudiés	114
Figure 91 : Gain de résistances à la compression des bétons étudiés	115
Figure 92 : Gain de résistances à la traction par fendage des bétons étudiés	116
Figure 93 : Gain de résistances en flexion des bétons étudiés	117
Figure 94 : Module d'élasticité à différents âges des bétons étudiés	117
Figure 95 : Résistivité électrique des bétons étudiés	118
Figure 96 : Perméabilité aux ions de chlorure à différents âges des bétons étudiés	119
Figure 97 : Facteur de durabilité des bétons étudiés	120
Figure 98 : Résultats des retraits endogènes des bétons étudiés	120
Figure 99 : Résultats des retraits de séchage des bétons étudiés	121
Figure 100 : Résistances à la compression des bétons étudiés (mûrissement à l'air)	122
Figure 101 : Résistances à la traction des bétons étudiés (mûrissement à l'air)	123
Figure 102 : Masses volumiques des BAP aux SR et des BAP aux gros GR (5-20 mm)	124
Figure 103 : Teneurs en SP des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	125
Figure 104 : Résistances à la compression des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	125
Figure 105 : Résistances à la traction des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	126
Figure 106 : Résistances en flexion des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	127
Figure 107 : Résistances à la traction des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	127
Figure 108 : Résistivités électriques des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)	128
Figure 109 : Résistance à la perméabilité aux ions chlorure (BAP aux SR et BAP aux GGR)	129
Figure 110 : Résistance aux cycles de gel-dégel (BAP aux SR et BAP aux GGR)	130
Figure 111 : Retrait endogène (BAP aux SR et BAP aux GGR)	131
Figure 112 : Retrait de séchage (BAP aux SR et BAP aux GGR)	131
Figure 113 : Courbe granulométrie du sable recyclé de MR-2 comparé avec le SN	134
Figure 114 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson	134

Figure 115 : Pertes de résistance à la compression à 91 jours	137
Figure 116 : Pertes de résistance à la traction à 91 jours	138
Figure 117 : Pertes de résistance à la flexion à 91 jours	138
Figure 118 : Pertes de rigidité	139
Figure 119 : La présence des matériaux résidus et du granulat d'enrobé bitumineux dans la surface de rupture où le moment flexionnel est maximal	139
Figure 120 : GR affectés par l'essai d'écaillage	143
Figure 121 : Écaillage du béton, cote numérique d'évaluation [Association Béton Québec, 2014]	143

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification québécoise des MR/NQ 2560-600 [Moniz, et al., 2013]	7
Tableau 2 : Composition de granulat recyclé de classe MR-2	8
Tableau 3 : Fuseau granulaire du MG-20 (NQ 2560-114).....	8
Tableau 4 : Densité et absorption des granulats recyclés de différentes sources	14
Tableau 5 : Méthodes de formulation et de malaxage [Boulay, 2014]	20
Tableau 6 : Comparaison entre le retrait d'un béton ordinaire et celui d'un béton de haute performance (endogène et séchage) [Piécard et Dieryck, 2004]	27
Tableau 7 : Régime de cure admissible selon l'association canadienne de la normalisation [A23.1-09/A23.2-09, 2011]	34
Tableau 8 : Gammes de teneur en poudre suggérées [ACI 237R, 2007]	38
Tableau 9 : Proportions des composants de BAP. [ACI 237R, 2007]	38
Tableau 10 : Classes de BAP en fonction de l'étalement [AFGC, 2008]	38
Tableau 11 : Norme ASTM utilisée	44
Tableau 12 : Densité, absorption et module de finesse des matériaux naturels	45
Tableau 13 : Granulométrie du sable naturel	46
Tableau 14 : Granulométrie des gros granulats naturels	47
Tableau 15 : Composition des GR de classe MR-2 [NQ2560-600].....	48
Tableau 16 : Gamme de teneur en liant en fonction de l'étalement (ACI 237)	52
Tableau 17 : Recommandations du comité de l'ACI sur l'emploi de béton autoplaçant.....	53
Tableau 18 : Proportions des bétons témoins et aux granulats recyclés	56
Tableau 19 : Densités à l'état SSS et absorptions des matériaux utilisés	56
Tableau 20 : Séquence de malaxage en deux étapes	57
Tableau 21 : Classes de pénétration des ions aux chlorures selon les valeurs de perméabilité aux ions chlorures et de résistivité électrique.	66
Tableau 22 : Pourcentage des fractions des granulats recyclés de classe MR-2	73
Tableau 23 : Rapport (sable / gros granulats) et (Gros granulats / somme de sable et gros granulats).....	73
Tableau 24 : Résultats de l'analyse granulométrique du MR-2 (5-20 mm).....	75
Tableau 25 : Granulométrie du sable recyclé de MR-2 (0-5 mm)	76
Tableau 26 : Densité et absorption de SR et GR.....	77
Tableau 27 : Les proportions des granulats nécessaires à la production des bétons autoplaçants étudiés.....	82
Tableau 28 : Proportions des BAP étudiés.....	83
Tableau 29 : Masses volumiques et teneurs en air des BAP étudiés.....	86
Tableau 30 : Demande en superplastifiant pour la formulation de 110 L et 1 m ³ de BAP	88
Tableau 31 : Résultats des étalements, T ₅₀ et J-ring des BAP étudiés dans la Phase (1).....	88
Tableau 32 : Résistances à la compression des bétons étudiés à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours....	90
Tableau 33 : Résistances à la traction des bétons étudiés à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours.....	91
Tableau 34 : Résistances en flexion (en MPa) des BAP étudiés à différents âges	93
Tableau 35 : Résultats du module E des bétons étudiés à 28, 56 et 91 jours	96
Tableau 36 : Module élastique instantané et taux de fluage à 91 jours.....	97
Tableau 37 : Résultats de la résistivité électrique en kΩ.cm à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours des bétons étudiés « 0%, 20%, 35% et 50% MR-2 (0-20 mm) »	100

Tableau 38 : Résultats de la perméabilité aux ions de chlorure à 28, 56 et 91 jours des bétons étudiés 0%, 20%, 35 % et 50%) MR-2 (0-20 mm)	101
Tableau 39 : Classes de perméabilité des ions chlorure et résistivité électrique selon la norme ASTM C1220	103
Tableau 40 : Résultats des essais de gel-dégel des bétons étudiés.....	104
Tableau 41 : Résultats des essais d'écaillage des bétons étudiés.....	105
Tableau 42 : Échelle d'écaillage ASTM C672.....	105
Tableau 43 : Masses volumiques et teneurs en air des BAP (35% MR-2 sec, 35% MR-2 saturé) avec TerC ³ et 35% MR-2 Tercem3000	112
Tableau 44 : Teneur en superplastifiant utilisé dans les mélanges étudiés	113
Tableau 45 : Résultats des étalements, T ₅₀ et J-ring des bétons étudiés	114

LISTE DES SYMBOLES

SYMBOLE	DEFINITION
Φ MAX	Diamètre maximum des granulats
ABS	Absorption
DSSS	Densité à l'état saturé surface sèche
M	Masse
V	Volume
SP	Superplastifiant
AEA	Agent air entrainé
E	Module d'élasticité
E/C	Rapport Eau / Ciment
TERC³	Ciment ternaire à base de 75% GU, 20% CV et 5% FS
F (K)	Taux de fluage
ϵ	Fluage

LISTE DES ACRONYMES

ACRONYME	DEFINITION
GR	Granulat recyclé
SR	Sable recyclé
GN	Granulat naturel
SN	Sable naturel
BAP	Béton autoplaçant
MTQ	Ministères des Transports du Québec
ASTM	American Society for Testing and Materials
FC'	Résistance à la compression
MR	Mortier résiduel
NQ	Normalisation du Québec
ACV	Analyse de cycle de vie
ITZ	Zone de transition interfaciale

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

L'exploitation des matières premières par l'industrie de la construction est en augmentation. Par ailleurs, les travaux de démolition des bétons en fin de vie génèrent des quantités phénoménales de débris. Ces matériaux peuvent avoir une répercussion directe sur l'environnement. La valorisation de ces matériaux dans l'industrie de la construction permettra de conserver les sources naturelles. L'utilisation d'éco-granulats issus de débris de construction représente, en effet, une alternative d'atténuation à l'exploitation des granulats naturels. Cette alternative semble prendre ces dernières années de l'ampleur. Ceci permettra de cadrer avec le développement durable et d'orienter les producteurs vers le développement des bétons verts. Des études sont, cependant, nécessaires pour évaluer le comportement de ces matériaux et pour atteindre les objectifs de valorisation des matériaux recyclés pour le développement et la validation de la performance des bétons verts performant et durable.

La valorisation des débris de construction est aperçue aujourd'hui comme une nécessité urgente qu'il faut prendre en charge. En effet, devant une prolifération importante de rebuts et gravats de construction générés par un développement intensif des activités (démolition, réhabilitation, construction, etc.), les espaces réservés d'enfouissement de ces déchets se réduisent de plus en plus et se saturent. Il est évident que les bétons recyclés offrent aujourd'hui une véritable alternative technique, écologique et économique dans plusieurs applications. La performance de ces matériaux recyclés doit répondre aux mêmes règles de qualité que les matériaux naturels, quant à leurs performances mécaniques, physiques, et leurs modes d'utilisation.

Cette étude vise alors à apporter des réponses concrètes et ciblées quant à la faisabilité à valoriser les granulats recyclés (GR) dans les bétons autoplaçants écologiques et durables. Les questions qui se posent et auxquelles nous tenterons de répondre sont : quelle est l'influence des granulats recyclés sur la maniabilité et les propriétés mécaniques des BAP ? Est-ce que la performance des granulats recyclés dans les BAP est dépendante de leur état de saturation ? Jusqu'à quel pourcentage de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés utilisé en assurant un BAP performant et durable ? Est-ce qu'on peut diminuer le retrait endogène et de séchage par un mûrissement interne en utilisant les MR saturés à l'eau dans les BAP à faible rapport E/C ?

1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer le potentiel d'utilisation des granulats recyclés dans des bétons autoplaçants de haute performance (faible rapport Eau/Liant) destinés à la réparation. Il est question d'étudier l'influence du taux de remplacement des granulats par des GR sur la maniabilité, les propriétés mécaniques, la durabilité et les propriétés viscoélastiques.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Caractérisation des granulats recyclés de type MR-2.
- Optimisation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés.
- Évaluation le comportement rhéologique, des propriétés mécaniques et la durabilité des BAP étudiés.
- Étude de l'effet de l'état de saturation des granulats recyclés sur l'ouvrabilité, propriétés mécaniques et le retrait de BAP.
- Étude de l'effet de la fraction fine des granulats recyclés sur le développement de retrait endogène et de séchage dans le béton autoplaçant à faible rapport E/L).
- Étude du mûrissement interne des bétons contenant des granulats recyclés saturés.

1.3 Structure de mémoire

Ce mémoire de maîtrise se divise en six chapitres :

Chapitre 1 : Introduction. Dans ce chapitre, on expose la problématique de l'étude. On présente également les objectifs de la recherche qui consistent à étudier l'effet du taux de remplacement des granulats naturels par les GR sur le comportement à l'état frais et les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité des BAP à faible rapport E/L.

Chapitre 2 : Revue de littérature. Le second chapitre constitue une revue bibliographique sur les granulats recyclés, les performances requises d'un béton élaboré avec les GR et l'impact négatif du mortier résiduel sur le comportement des bétons, notamment le béton autoplaçant.

Chapitre 3 : Méthodologie. Ce chapitre concerne le programme expérimental réalisé afin d'atteindre les objectifs visés, notamment les différentes propriétés des granulats recyclés et les formulations des BAP aux GR optimisées. Les procédures d'essais utilisées sont également décrites.

Chapitre 4 : Présentation des résultats. Dans ce chapitre, on présente les résultats obtenus dans cette étude.

Chapitre 5 : Analyse des résultats et discussions. Ce chapitre présente l'analyse des résultats et une discussion de l'influence de différents paramètres étudiés sur les propriétés des BAP aux granulats recyclés. On met en évidence notamment l'effet du remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés saturés à l'eau sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et retrait des BAP à faible rapport E/L destinés à la réparation.

Chapitre 6 : Conclusions et recommandations. Ce chapitre présente les conclusions de cette étude. Nous soulignons l'effet des granulats recyclés secs et totalement saturés à l'eau sur le comportement des BAP à l'état frais, leurs propriétés mécaniques et leur durabilité à l'état durci.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Actuellement, l'industrie de construction dispose de plusieurs procédés permettant de recycler jusqu'à 100% des bétons démolis. Une fois démantelés, ces derniers sont envoyés vers des centres de concassage. Les granulats résultants de ces opérations sont, par la suite, réutilisés dans diverses applications (remblais, bétons structuraux et non structuraux, aménagement extérieur, matériaux de remplissage, etc.) [Fabrigat, 2012].

Dans le cadre de la présente étude, on vise la valorisation des granulats recyclés dans la formulation des BAP, ce qui permettra de leur donner une seconde vie pour développer des éco-granulats. Ainsi, jusqu'à la moitié des granulats naturels (grossiers et fins) seront remplacés par des granulats recyclés. Cette méthode a été adoptée par plusieurs pays à travers le monde, notamment en Europe et en États-Unis. Cette analyse de la situation permet de faire ressortir les éléments pertinents quant à l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons autoplacants à faible rapport E/C destinés à la réparation.

2.2 Granulats recyclés

Dans le classement des déchets de la construction, les déchets des démolitions sont classés dans la deuxième position (Figure 1), après les déchets des cimenteries [THIERY *et al.*, 2011]. Des granulats recyclés sont produits en concassant et en recyclant des matériaux de chantiers de démolition comme les bétons (Figure 2). Après concassage et criblage, leur usage reste souvent réservé à des emplois spécifiques compte tenu de leur qualité particulière et de la réglementation en cours [NQ 2590-600/2002, 2002].

Les matériaux granulaires ciblés dans cette étude sont des granulats recyclés des bétons de démolition de classe MR-2 selon la norme BNQ 2590-600/2002.

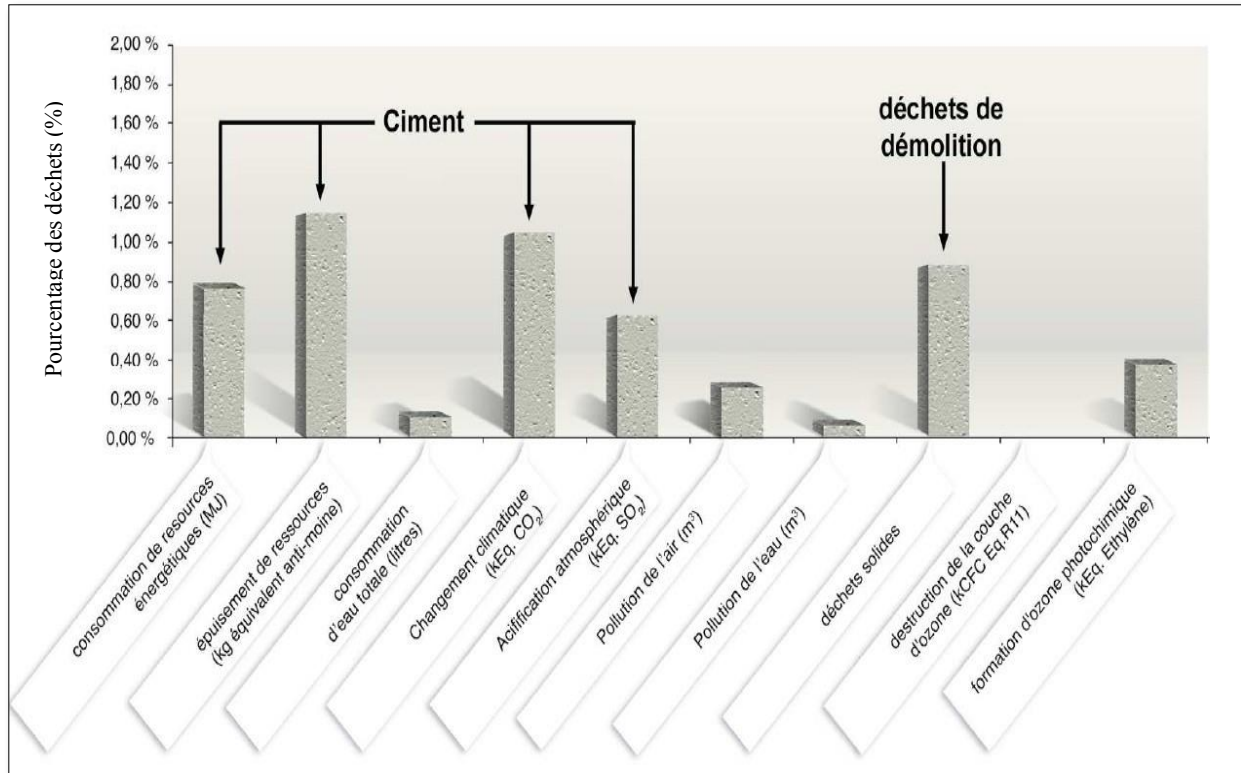


Figure 1 : Déchets affectant l'environnement [Thiery *et al.*, 2005]



Figure 2 : Déchets de démolition [Fabrigat, 2012]

Au niveau de la gestion des déchets de construction et de démolition, 2,7 milliards de tonnes de granulats sont utilisées actuellement aux États-Unis [Gilpin *et al.*, 2004]. L'utilisation de ces matériaux est répartie comme suit :

- 10 à 15% sont utilisés dans les travaux des trottoirs ainsi que les travaux routiers, notamment les assises de chaussées, les terrassements, les remblais, les couches de forme, etc.).
- 20 à 30% sont utilisés dans les travaux d'entretien, tel que les bétons de pavage et de réparation.
- 60 à 70% sont utilisés dans les bétons structuraux.

Généralement, les granulats recyclés sont produits par les producteurs d'agrégats naturels. Des mesures incitatives pour le transport des déchets de béton et de granulats transformés à partir de sites de production sont offertes pour promouvoir l'utilisation des granulats recyclés, mais une grande partie de la production est appropriée seulement comme matériau de remblai pour les chaussées [Gilpin *et al.*, 2004].

Par ailleurs, en France le secteur des Bâtiments et Travaux Publics (BTP) a généré plus de 250 millions de tonnes de déchets en 2008 [Clik eco, 2018]. Ceci représente 30% des déchets produits toutes activités confondues et 70% des déchets d'entreprise produits. Ce sont près de 40 millions de tonnes de déchets qui ont été produits et ce volume est réparti comme suit :

- 22 millions de tonnes produits par les chantiers de démolition et 14 millions de tonnes produits par les chantiers de réhabilitation ;
- 4 millions de tonnes produits par les chantiers de construction.

Face à ces quantités, l'enjeu du tri et de la valorisation des déchets de chantier apparaît donc comme primordial. La directive-cadre, adoptée en 2008, impose la valorisation de 70% des poids des déchets de construction et de déconstruction des BTP d'ici 2020 [Clik eco, 2018]. Au Québec, le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition génère une grande quantité de matières résiduelles. En effet, il est responsable d'environ 41% de la quantité totale des matériaux recyclés générés au Québec en 2008. Les résidus sont générés par deux grandes divisions du domaine de la construction, de la rénovation et de la démolition : la division des routes et des infrastructures routières ainsi que celui du bâtiment [Boisvert *et al.*, 2015] [Recyc-Québec, 2015].

2.3 Classification des granulats recyclés

Les granulats recyclés sont très variables dépendamment de la source et la nature du béton de démolition. En Europe et en Amérique du Nord, il existe plusieurs méthodes de classification. Cette classification a pour but d'améliorer la compréhension de la valorisation des matériaux. Au Québec, la classification est régie par la norme NQ 2560-600, qui la subdivise en sept catégories distinctes. Le Tableau 1 montre la classification des granulats recyclés selon la norme NQ 2560-600. Ce tableau indique les proportions et les limites sur les quantités relatives des différentes catégories de matériaux composés de granulats recyclés, où de bétons de ciment (b.c.), d'enrobés bitumineux (béton bitumineux, « b.b ») et des granulats naturels (g.c.), à respecter pour chaque classe de granulats recyclés [Moniz *et al.*, 2013].

Tableau 1 : Classification québécoise des MR/NQ 2560-600 [Moniz, *et al.*, 2013]

Classes	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
% b.c	≤ 50%	> 50 %	≤ 30 %	> 30 %	< 65 %	< 50 %	< 15 %
% b.b	≤ 15%	≤ 15 %	15-35 %	15-35 %	35-50 %	50-85 %	> 85 %
% g.c	≥ 35%	< 50 %	35-85 %	35-85 %	< 65 %	< 50 %	< 15 %

Nous constatons que les matériaux de type MR-2 sont constitués généralement de béton de ciment supérieur à 50 % et jusqu'à 15 % béton bitumineux. Ces types des granulats recyclés en provenance des bétons de ciment, tandis que ceux du type MR-7 sont composés majoritairement de bétons bitumineux [Moniz *et al.*, 2013]. Dans le cadre de la présente étude, nous utiliserons des granulats recyclés de classe MR-2 (calibre 31,5 mm) en provenance du fournisseur Recy-Béton. Ces granulats contiennent du béton, des granulats naturels ainsi que des enrobés bitumineux (Tableau 2).

Les projets de cette nature permettront un développement durable en harmonie avec les procédés et règlements environnementaux, procurant à la fois qualité, économie et durabilité.

Tableau 2 : Composition de granulat recyclé de classe MR-2

	Proportion des constituants (%)					
Matériaux composés MR-2	MR-2/NQ 2560-600	Pellerin, 2000	Moniz, 2013	Boulay, 2014	Bastien, 2016	Turcanu, 2017
Résidus d'enrobés (EB)	≤ 15	15	12,5	5	2	9
Résidus de bétons (BC)	> 50	85	80	74	80	88
Granulats naturels (GN)	< 50	10	7,5	21	18	3

2.4 Propriétés physiques

La présence d'asphalte, de résidus et de mortier résiduel attachés au granulat original affecte les propriétés des granulats et leur comportement dans le béton. Ces propriétés sont la distribution granulométrique, la masse volumique, l'absorption d'eau, la vitesse d'absorption, le volume de mortier résiduel et la porosité.

2.4.1 Granulométrie des granulats recyclés

Les granulats recyclés ont généralement plus de particules fines que les granulats naturels. Cette caractéristique varie beaucoup en fonction du type de granulats recyclés. Selon la norme Québécoise (NQ 2560-600) qui décrit comment effectuer une analyse granulométrique, les granulats recyclés doivent posséder une granulométrie qui respecte les exigences de la norme NQ 2560-114 en fonction de l'utilisation pour laquelle ils sont destinés. Le Tableau 3 présente le fuseau granulaire [Moniz *et al.*, 2013].

Tableau 3 : Fuseau granulaire du MG-20 (NQ 2560-114)

Tamis (mm)	Passant (%)
31,5	100
20	90-100
14	68-93
5	35-60
1,25	19-38
0,315	9-17
0,080	2-7

[Moniz *et al.*, 2013]. Réalisent l'essai de la granulométrie par tamisage sur chacun des matériaux granulaires-sources, pour cinq MR retenus pour leur étude (MR-2 à MR-6). Les analyses granulométriques des cinq échantillons ont été réalisées conformément à la norme NQ2560-040. Il

en ressort que toutes les courbes granulaires des matériaux recyclés de classe MR demeurent à l'intérieur du fuseau prescrit par le NQ 2560-600.

Les résultats d'analyse granulométrique des matériaux recyclés MR-2, MR-3, MR-4, MR-5 et MR-6 sont présentés dans la figure 3.

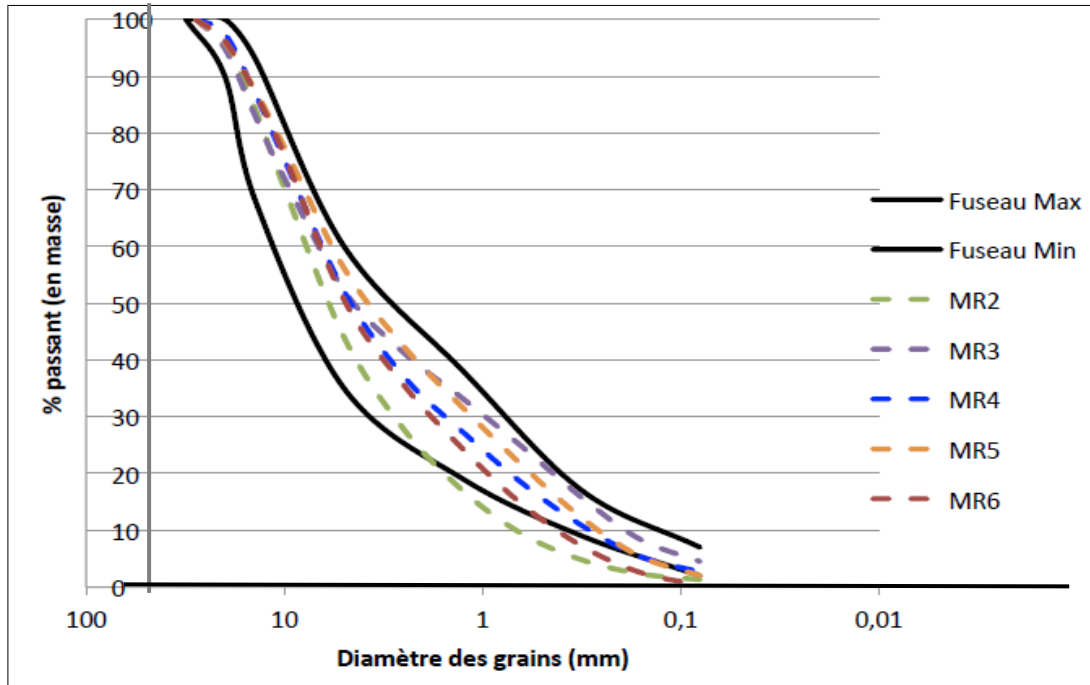


Figure 3 : Analyse granulométrique des matériaux recyclés [Moniz *et al.*, 2013]

2.4.2 Masse volumique

La densité des granulats recyclés est moins grande que celles des granulats normaux. La littérature indique que la densité des granulats recyclés se situe généralement autour de 2,4 et 2,5 [Chakradhara Rao *et al.*, 2011 ; de Juan et Gutierrez, 2009 ; Aitcin *et al.*, 2012]. Par contre, la densité des granulats normaux est autour de 2,75 [Aitcin *et al.*, 2012]. La masse volumique des granulats recyclés est plus faible à cause de la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original [Chakradhara Rao *et al.*, 2011].

2.4.3 Mortier résiduel

Les granulats fabriqués à partir des déchets de démolition ont une forme différente en comparaison aux granulats naturels [Douara *et al.*, 2009]. Les gros granulats de bétons recyclés de type MR-2 (G-MR-2) peuvent être composés d'un ou plusieurs gros granulats naturels (GN) entourés

partiellement ou entièrement par une couche de mortier résiduel collé (Figure 4). La présence de ce mortier résiduel avec une quantité importante dans les granulats recyclés donne une caractéristique différente aux GR. Ces granulats fabriqués à partir des déchets de bétons de démolition ont plusieurs formes :

- (1) Un grain de gravier enrobé par la pâte de ciment ou du mortier résiduel ;
- (2) Une pâte de ciment seule ou un mortier résiduel seul ;
- (3) Un grain de gravier naturel.

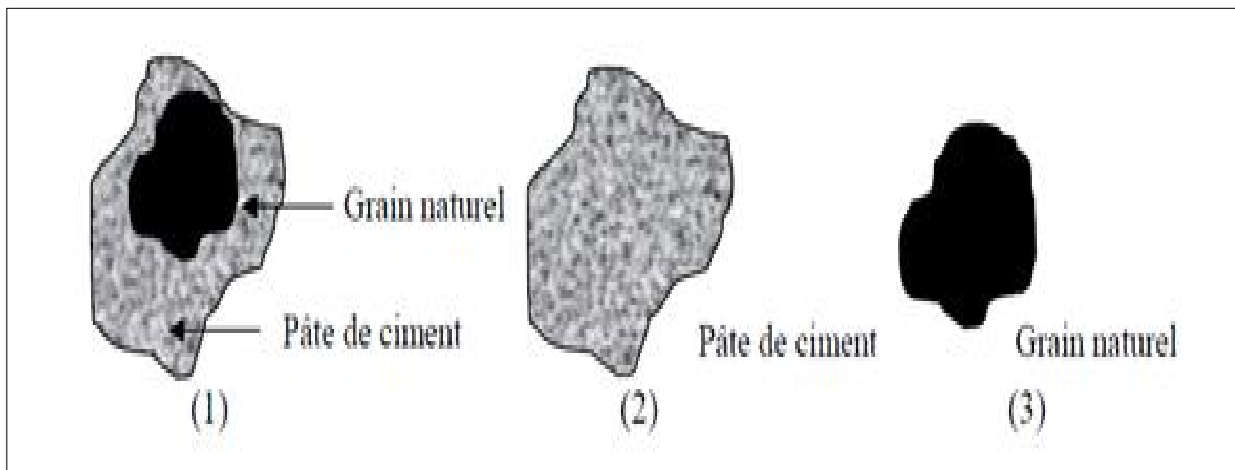


Figure 4 : Formes des granulats recyclés [Douara *et al.*, 2009]

L'ancien mortier resté adhérent au granulat est défini comme étant l'ancien liant resté accroché après les granulats naturels provenant d'un ancien béton, il est communément appelé **mortier résiduel**. L'ensemble des deux phases (GN et MR) récupérées lors des travaux de démolition et de concassage compose le granulat recyclé (Figure 5). Il est important de mentionner que les formulations incorporant des GR sont souvent produites sans tenir compte de la présence du mortier résiduel où il a été observé que les mélanges préparés sont souvent surdosés en liant générant des résistances largement supérieures aux résistances visées. Cela est expliqué par la contribution du mortier résiduel dans l'augmentation des résistances mécaniques. Par exemple, de Juan et Gutiérrez (2009) concluent que la teneur du mortier résiduel tolérable pour des bétons structuraux incorporant des GR doit être inférieure à 44% du volume total.

Par ailleurs, la qualité d'un granulat recyclé dépend de deux principaux paramètres [Gutiérrez et de Juan, 2009] :

- **Qualité** du granulat naturel et celle du mortier résiduel,

- **Proportion** des deux phases, notamment celle du mortier résiduel.



Figure 5 : Différentes phases qui composent un granulat recyclé [Fantous, 2015]

2.4.3.1 Méthodes pour décoller un mortier résiduel

La détermination de la teneur du mortier résiduel pourrait être établie selon trois méthodes distinctes.

1) Méthode de dissolution dans l'acide nitrique

Ce procédé consiste à faire immerger l'échantillon dans une solution d'acide nitrique à une concentration de 20% (en volume) et le faire chauffer pendant environ deux heures pour permettre au mortier résiduel de se détacher. Néanmoins, cette technique ne pourra être utilisée dans le cas des granulats d'origine calcaire vue leur sensibilité à l'acide nitrique, ce qui faussera les résultats obtenus [Butler *et al.*, 2011].

2) Méthode de gel-dégel

Cette méthode consiste en l'immersion de l'échantillon dans une solution de sulfate de sodium. L'échantillon est séché à l'étuve à une température de (105°C) pendant 24 heures. Par la suite, il est soumis à cinq cycles de gel-dégel pour induire des contraintes thermomécaniques, soit faire subir à l'échantillon quotidiennement 16 heures de congélation à (-17°C) suivi de 8 heures de décongélation à (80°C). Toutefois, après le dernier cycle, l'échantillon sera lavé sur le tamis N°4 et séché encore une fois à une température de (105°C) pendant 24 heures. L'attaque chimique et

les contraintes imposées à l'échantillon permettent d'extraire le mortier résiduel [Abbas *et al.*, 2008].

3) Méthode de l'expansion thermique

Cette méthode consiste à procéder au trempage de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures et le faire exposer, par la suite, à des températures supérieures à 400°C pendant 2 heures. Ce même échantillon, après sa sortie du four, est rapidement immergé dans l'eau froide. Ainsi, les chocs thermiques permettront de faire décoller le mortier résiduel. Cette technique permet de récupérer jusqu'à 100% du mortier. La quantité de la teneur en mortier résiduel, exprimée en pourcentage, est identifiée par l'équation suivante [Butler *et al.*, 2011] :

$$\text{Mortier résiduel (\%)} = \frac{\text{Poids des GR} - \text{Poids des GR après enlèvement du mortier résiduel}}{\text{Poids des GR}} \quad \text{Équation (1)}$$

Gutiérrez et de Juan (2009) ont développé un processus expérimental similaire à celui précité. Ils rajoutent en plus du trempage de l'échantillon dans l'eau pendant 2 heures et son exposition à une température de 500°C pendant 2 heures une percussion, qu'il se peut qu'une partie du mortier résiduel reste accrochée après les granulats et qu'il soit nécessaire d'utiliser un marteau en caoutchouc ou gratter les granulats en question afin de récupérer tout le mortier résiduel. L'échantillon est tamisé, par la suite, sur le tamis de (4 mm) pour déterminer le poids de la portion grossière avec l'équation (1) susmentionnée [Gutiérrez et de Juan, 2009].

2.4.3.2 Quantification du mortier résiduel

Les impacts du mortier résiduel sur les différentes propriétés du béton sont énumérés dans la section 2.5 (facteurs influents sur les propriétés du nouveau béton à base des granulats recyclés). Afin d'étudier son impact sur les formulations à produire, la séparation du mortier résiduel s'avère essentielle. La Figure 6 présente un schéma de la séparation du mortier résiduel.

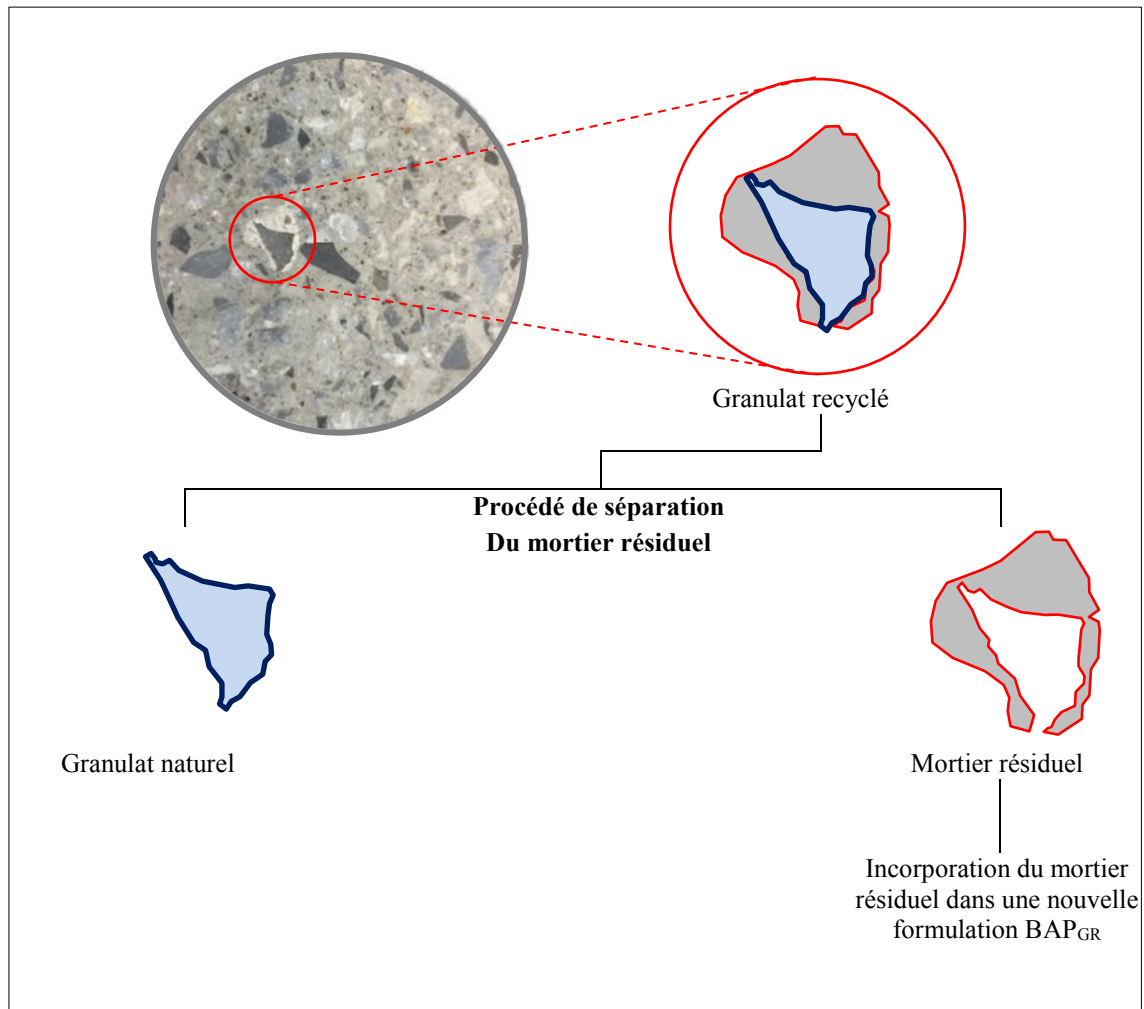


Figure 6 : Présentation schématique de la séparation du mortier résiduel
[Fantous, 2015]

2.4.4 Zone de transition à l'interface granulat/pâte

Dans les Figures 5 et 6, on observe la présence de deux zones de transition, une ancienne ITZ1 située à l'interface du GN et le mortier résiduel provenant d'un ancien béton de démolition et d'une nouvelle ITZ2 située entre le mortier résiduel et la nouvelle pâte (Figure 6). L'ITZ1 reflète les propriétés réelles d'un GR sur lesquelles repose la qualité du béton, notamment celle en lien avec son comportement mécanique [Grondin, 2011].

2.4.5 Absorption et vitesse d'absorption des granulats recyclés

La densité et l'absorption d'eau des granulats sont considérées comme les paramètres les plus importants du contrôle de la qualité des granulats recyclés.

a) L'absorption :

L'absorption d'eau par des granulats recyclés est une propriété qui caractérise ce dernier. La dimension affecte la vitesse d'absorption et la quantité d'eau absorbée [Boulay, 2014]. Cette forte capacité d'absorption de granulats recyclés reste variée, quelle que soit la provenance d'anciens bétons [Grondin, 2011; Naël-Redolfi, 2016; Turcanu, 2017]. Le Tableau 4 présente les densités et l'absorption des granulats recyclés de deux différentes sources, GR de Bouval (BV) et GR de Recy-Béton (MTL).

Tableau 4 : Densité et absorption des granulats recyclés de différentes sources
[Turcanu, 2017]

Essais	Densité			Absorption	Teneur en eau
Granulat	Brute	SSS	Apparente	(%)	(%)
Pierre BV-31 mm	2,40	2,49	2,64	3,84	3,20
Pierre MTL-28 mm	2,40	2,49	2,64	3,79	1,80
Pierre MTL-20 mm	2,40	2,49	2,64	3,85	1,60
Fin BV-5 mm	2,14	2,32	2,62	8,95	5,40
Fin MTL-5 mm	2,20	2,36	2,63	7,10	2,70

Ce critère influe principalement sur le comportement rhéologique des bétons à l'état frais. Les compositions des bétons fabriqués avec des granulats recyclés de béton exigent une quantité d'eau supplémentaire pour l'obtention d'une ouvrabilité similaire à celle des bétons aux granulats naturels [Grondin, 2011].

Le mortier est reconnu comme un matériau poreux (porosité élevée). Les interstices ont tendance à capter l'eau et à la retenir. Il n'y a donc pas suffisamment d'eau libre pour hydrater les grains de ciment [Grondin, 2011]. Selon les travaux de [Boulay, 2014], l'absorption d'eau pour le sable recyclé (la fraction fine inférieure à 5 mm) est d'environ 10% par rapport à celle des gros granulats de béton recyclés à partir de 5 à 8%. Les caractéristiques des sables recyclés sont présentées comme celles des granulats recyclés en général, parce que dans certains cas, les sables recyclés n'ont pas été étudiés séparément.

Les résultats des travaux réalisés sur l'influence des granulats recyclés sur le comportement de mortier de béton équivalent (MBE) montrent qu'en dessous de 30% de taux de remplacement du sable naturel par de sable recyclé, la teneur de superplastifiant (SP) à utiliser pour maintenir un étalement donné à T_0 (temps après malaxage) est quasiment constante [Z. Tahar, 2015]. Au-delà de 30% de sable recyclé, la teneur de SP nécessaire augmente (Figure 7). Effectivement, le sable

recyclé absorbe beaucoup plus d'eau que le sable naturel pour maintenir un même étalement. Avec un pourcentage de substitution de SR plus élevé, la demande en adjuvant est logiquement plus importante (Figure 8) [Z. Tahar, 2015].

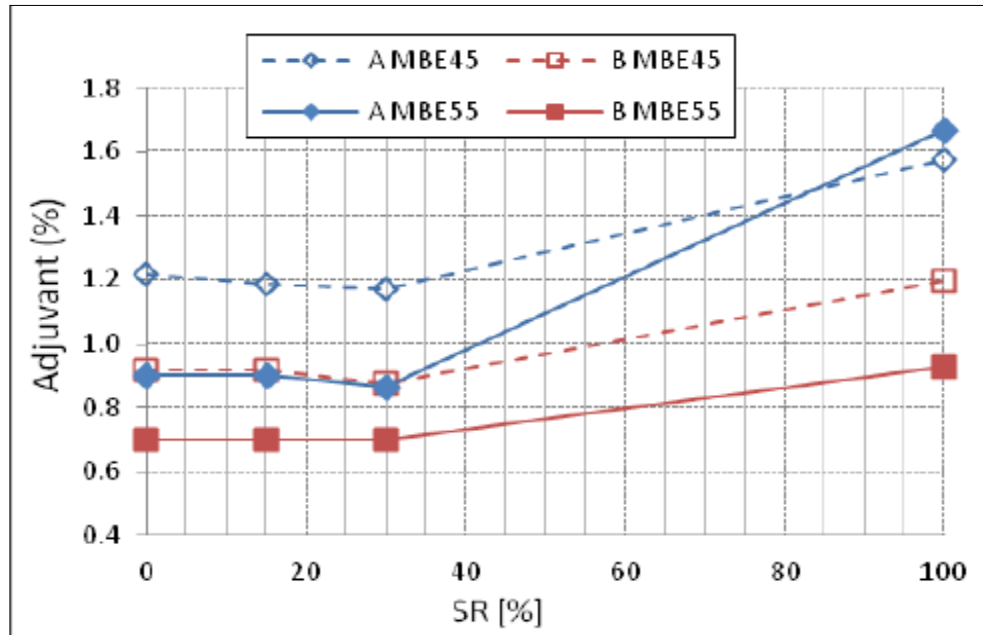


Figure 7 : Pourcentage d'adjuvant utilisé en fonction du pourcentage de substitution SR afin de maintenir un étalement de 280 mm à l'instant initial (T_0) [Z. Tahar, 2015].

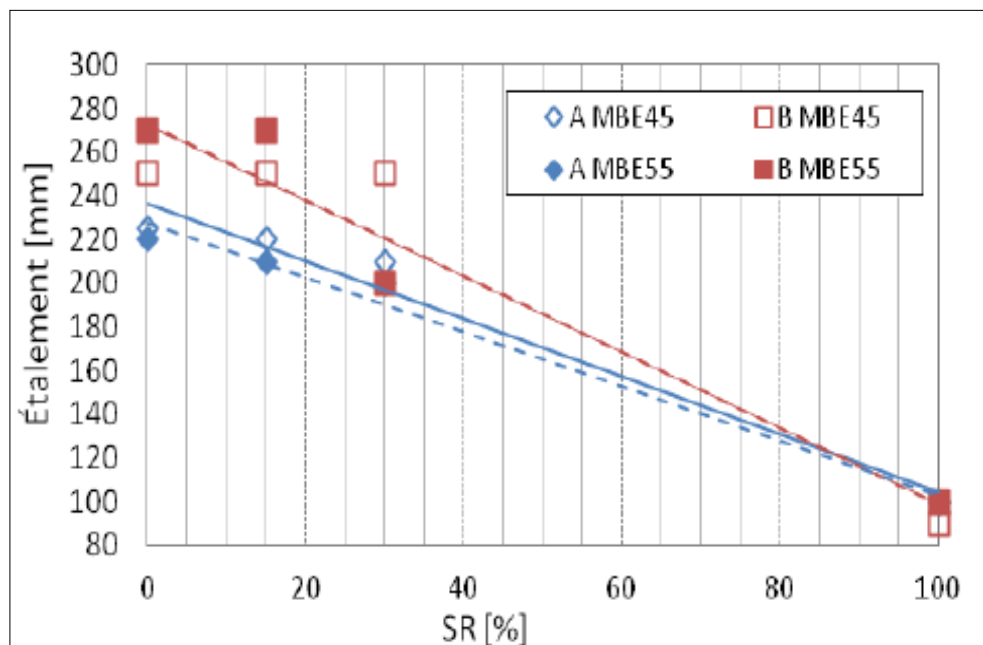


Figure 8 : Evolution de l'étalement à T_0 en fonction du pourcentage de SR pour les 4 configurations [Z. Tahar, 2015]

b) Cinétique d'absorption des granulats recyclés

La détermination de la vitesse d'absorption est une étape importante pour pouvoir contrôler la quantité d'eau de gâchage pendant le malaxage des bétons contenant des granulats recyclés. La vitesse d'absorption varie dépendamment de type et de la taille des granulats [Boulay, 2014]. Le granulat recyclé est caractérisé comme étant un granulat poreux. L'utilisation de ces granulats absorbe l'eau de gâchage et influe sur la maniabilité du mélange. Boulay a réalisé un essai pour étudier la cinétique d'absorption des GR de classe MR-2 et GN (Figure 9), en adoptant l'essai initialement développé par Djerbi Tegguer pour quantifier la vitesse d'absorption des granulats recyclés [Boulay, 2014]. Turcanu en 2017 a aussi effectué le même essai pour estimer la quantité d'eau nécessaire pour l'absorption des GGR et le temps optimal d'introduction du ciment dans le malaxeur (Figure 10). L'absorption élevée des GR peut favoriser l'accumulation des particules de ciment autour de la surface du granulat recyclé et densifier la deuxième zone de transition [Yadav et Pathak, 2009 ; Turcanu, 2017]. Cet effet améliore ainsi la résistance du béton et diminue l'absorption d'eau par des granulats recyclés [Turcanu, 2017].

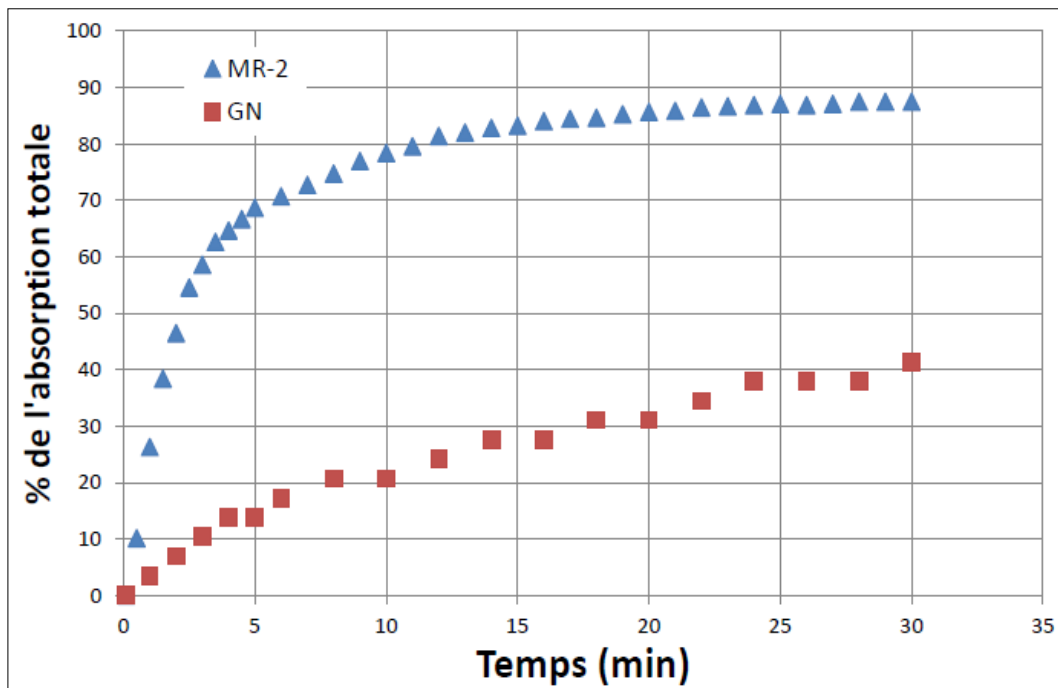


Figure 9 : Comparaison de la vitesse d'absorption du MR-2 avec un granulat naturel [Boulay, 2014]

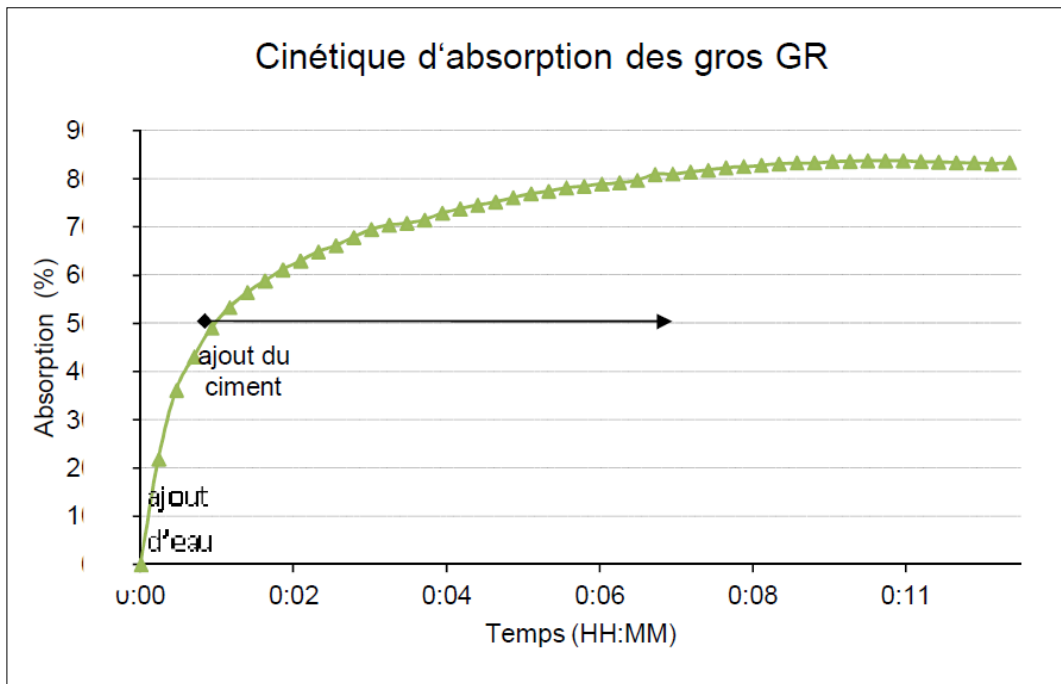


Figure 10 : Cinétique d'absorption des GGR [Turcanu, 2017]

c) Cinétique d'absorption des granulats recyclés carbonatés

La forte absorption des granulats recyclés (GR) peut être réduite par un traitement de carbonatation. L'amélioration des propriétés des granulats recyclés des bétons de démolition par carbonatation réduit la porosité capillaire et le taux d'absorption GR et la cinétique d'absorption (Figures 11 et 12). L'effet de la carbonatation sur les granulats recyclés est responsable d'un colmatage de la microstructure, ce qui induit un abaissement de la porosité et de la capacité d'absorption des particules (Figure 13) [Thiery *et al.*, 2011].

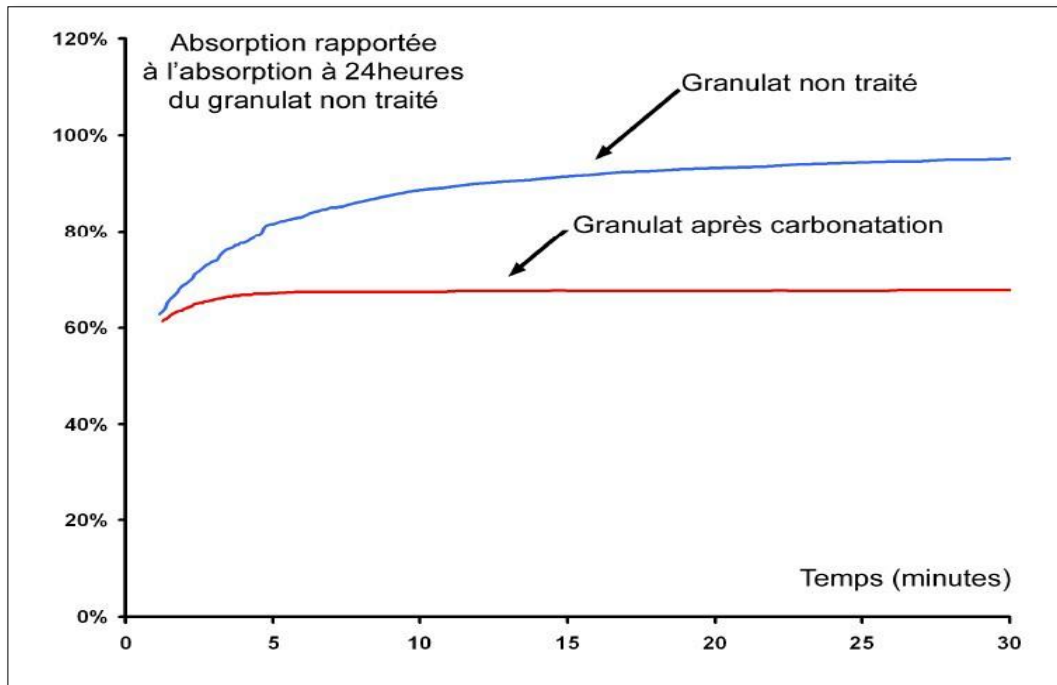


Figure 11 : Cinétique de l'absorption des granulats recyclés traités / granulats recyclés non traités par la carbonatation [Thiery *et al.*, 2011]

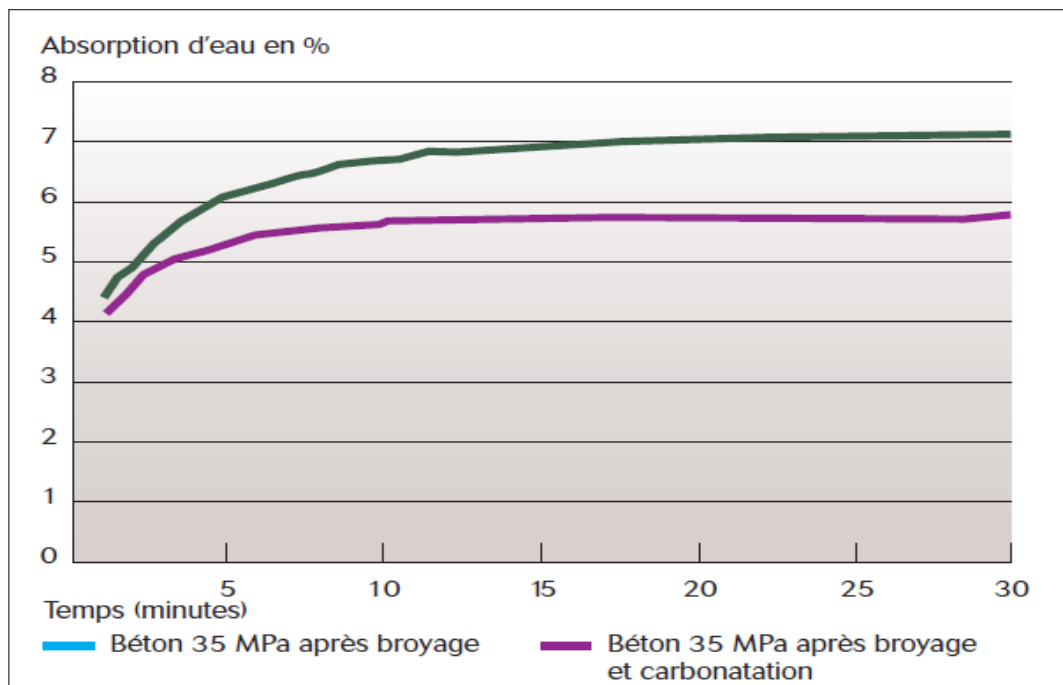


Figure 12 : Influence du procédé de carbonatation sur la cinétique d'absorption des granulats recyclés [Thiery *et al.*, 2011]

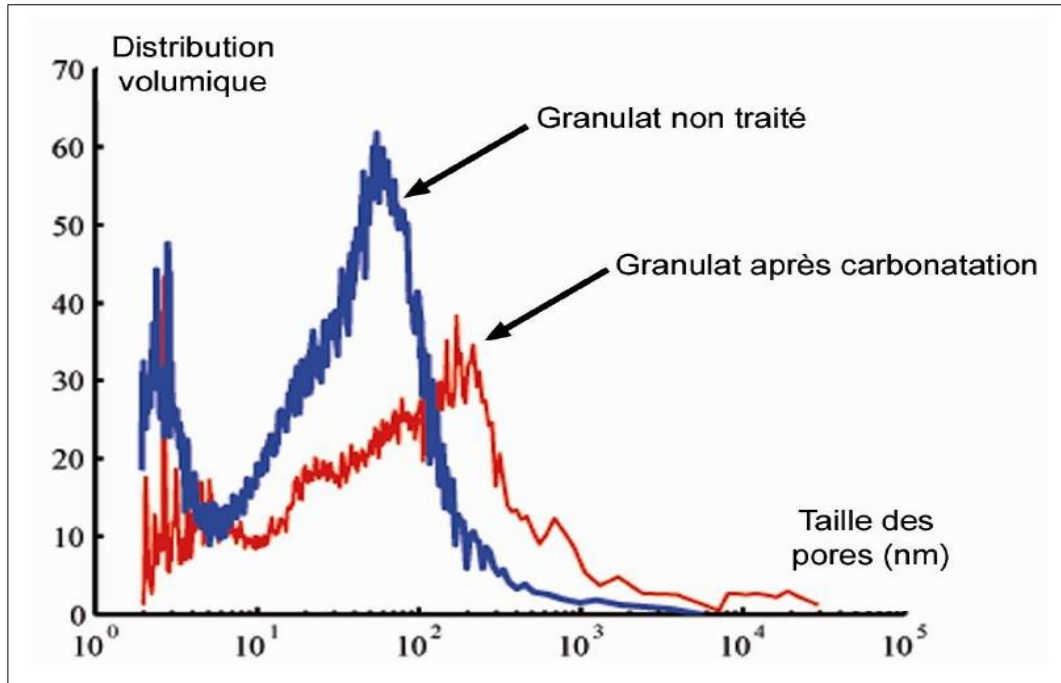


Figure 13 : Colmatage global de la microstructure (abaissement de la porosité) des granulats recyclés traités / granulats recyclés non traités [Thiery *et al.*, 2011]

2.4.6 Séquence de malaxage des bétons aux granulats recyclés

Plusieurs auteurs ont présenté dans leurs formulations quelques méthodes de malaxage pour des bétons incorporant des GR. Celles qui se distinguent le plus sont la méthode du mélange en deux étapes [Tam et Tam, 2007] et la méthode de la pré-saturation et de la compensation d'eau [Ferreira *et al.*, 2011] (Tableau 20). Dans le cadre de la présente étude, nous opterons pour la méthode de malaxage en deux étapes, légèrement modifiée (temps de malaxage), qui a été d'ailleurs déjà expérimenté au laboratoire de l'Université de Sherbrooke (Tableau 21) [Fantous, 2015].

Cette méthode a pour avantage de former une enveloppe protectrice tout autour des GR. Cela peut se résumer en un pré-traitement de ces granulats, remplissant ainsi leurs pores et comblant les fissures qui pourraient être présentes, réduisant par le fait même leur porosité et améliorant leur interface avec le nouveau liant. Ce type de formulation permet également d'améliorer l'imperméabilité du béton, son comportement mécanique et réduit sa déformation par rapport au GR [Tam et Tam, 2007].

Tableau 5 : Méthodes de formulation et de malaxage [Boulay, 2014]

Méthode de formulation et malaxage traditionnelle	Méthode de formulation et malaxage en deux étapes	Méthode de formulation par la présaturation et la compensation en eau
Sable +	Sable +	Eau (compensation de l'eau absorbée) + GR +
Ciment +	Granulats +	Présaturation 5 min
Granulats +	Malaxage 60 sec +	Ciment + Granulats +
Eau +	50% d'eau +	Malaxage 90 sec
Malaxage 120 sec	Malaxage 60 sec +	Sable à 30 sec du malaxage +
	Ciment +	Malaxage 180 sec
	Malaxage 30 sec +	
	50% d'eau +	
	Malaxage 120 sec	

2.5 Propriétés du béton à base de granulats recyclés

Plusieurs propriétés des nouveaux bétons aux granulats recyclés sont affectées par le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés. La présence de mortier résiduel, la qualité de la zone de transition et la forte absorption ont un impact sur les propriétés du béton aux GR. Les caractéristiques des GR sont majoritairement inférieures à celles des GN, donnant naissance à des mélanges présentant inévitablement des propriétés mécaniques inférieures également. C'est pourquoi leur proportion, comme substituant, est toujours limitée dans les mélanges de béton. Parmi celles-ci, on peut citer :

1) Densité :

Lorsque le taux de substitution des GN par des GR est important, cela a pour effet de diminuer la densité du mélange produit [Wen *et al.*, 2014]. La densité relative des GR à l'état SSS (saturé surface sèche) est inférieure de 7 à 9% par rapport à celle des GN [Limbachiya *et al.*, 2000]. La densité du nouveau béton contenant des granulats recyclés pourrait subir une baisse d'environ 17% de leur densité par rapport à un béton sans substitution. Cette dernière est attribuée principalement au mortier résiduel restant collé après les GR [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

2) Affaissement et maniabilité :

Dépendamment du taux de remplacement, les granulats recyclés causent une légère diminution de l'affaissement lors de la préparation des mélanges ainsi que sur leur maniabilité [Wen *et al.*, 2014]. Lors des opérations de malaxage, le liant trouve de la difficulté à s'écouler sur les parois des GR, dû à leur texture granuleuse comparativement à celles des GN qui sont considérés comme étant

lisses [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Le pré-mouillage des granulats recyclés peut minimiser le dosage en eau des bétons et faciliter leur ouvrabilité [Berredjem Layachi, 2009 ; Meftah *et al.*, 2011 ; Turcanu, 2017].

3) Porosité et absorption :

Les deux propriétés sont principalement influencées par le mortier résiduel capable par sa nature d'en magasier de l'eau dans ses interstices et présentant une porosité plus grande, ce qui peut induire une absorption supérieure à celle d'un GN. La variation de l'absorption entre un GN et un GR pourrait atteindre 4,2%, soit le GR présente une absorption supérieure à celle d'un GN [Limbachiya *et al.*, 2000 ; Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001].

4) Air entrainé :

L'utilisation des granulats recyclés n'affecte pas les proportions d'air entrainé qui reste conforme aux standards d'utilisation [Wen *et al.*, 2014].

5) Module d'élasticité :

Le module d'élasticité (E) du béton est principalement influencé par la pâte de ciment, le type et le volume de granulat, la qualité de la zone de transition interfaciale (ITZ). Il dépend aussi de l'âge du béton. Wen (2014) conclut que jusqu'à une substitution de 45%, il n'y a aucune influence ou presque sur le module de rupture [Wen *et al.*, 2014]. Le module de rupture pour un béton avec un faible rapport E/C est supérieur à celui d'un béton conventionnel, tandis que celui formulé avec un grand rapport E/C, son module de rupture est jugé inférieur [Tavakoli *et al.*, 1996]. Le module de rupture est étroitement lié à la capacité d'absorption des granulats recyclés. Les bétons incluant des GR et présentant une absorption supérieure donnent un module de rupture inférieure à celui d'un béton témoin, contrairement à ceux qui présentent une faible absorption. Cela est principalement attribué au mortier résiduel [Yang *et al.*, 2008]. Pour des taux de remplacement allant de 5 à 50%, la diminution du module de rupture n'est évaluée qu'à seulement 13% [Kang *et al.*, 2012]. Le module d'élasticité, quant à lui, est intimement lié à celui des GR, car ces derniers sont plus sujets à la déformation que les GN conduisant ainsi à une baisse de ce module, qui reste proportionnel au taux de substitution [Exteberria *et al.*, 2007]. La plupart des études convergent pour admettre que la diminution du module d'élasticité augmente avec l'augmentation du taux de remplacement des GN par des GR [Maruyama *et al.*, 2004].

6) Retrait :

Le retrait dépend principalement de la quantité d'eau en excès, de la teneur en liant et la qualité des granulats recyclés. Wen (2014) avait conclu qu'un taux de remplacement égal à 45% pourrait causer une augmentation du retrait allant jusqu'à 30%. De plus, l'utilisation de granulat recyclé augmente la demande en eau, ce qui augmenterait inévitablement le retrait de séchage [Wen *et al.*, 2014].

Boulay a observé que pour un même taux de remplacement des granulats recyclés de 50 % dans le béton formulé avec un rapport E/C égale à 0,55, le béton fabriqué avec le ciment GU développe un retrait de séchage supérieur à celui fabriqué avec le ciment ternaire du type TerC³ (Figure 14). Donc, la composition du béton aux GR et liant du type TerC³ diminue le retrait de séchage par rapport au mélange de référence proportionné avec 100% de GN [Boulay, 2014].

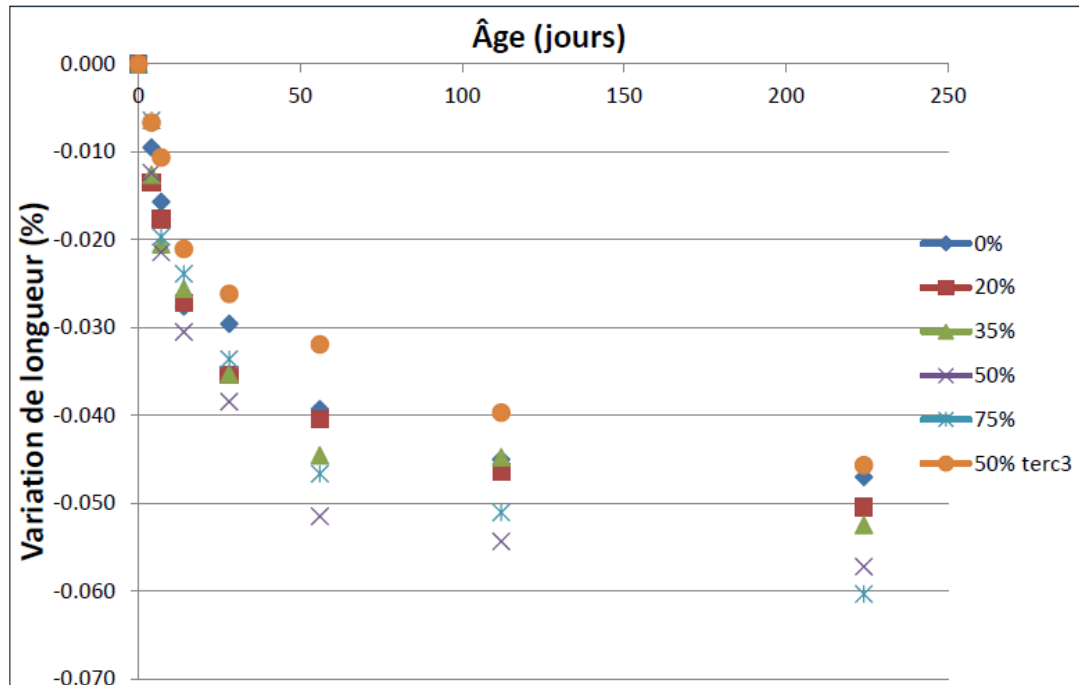


Figure 14 : Retrait de séchage des mélanges ayant un rapport E/C de 0,55 [Boulay, 2014]

7) Fluage :

Le fluage à la compression consiste à appliquer une charge inférieure (40%) à sa capacité de rupture pendant un intervalle de temps prolongé, alors que la compression consiste à charger l'échantillon jusqu'à sa rupture.

Le fluage est un phénomène important à considérer dans le cas des bétons contenant des GR. La plupart des recherches tendent à confirmer que le fluage est proportionnel au taux de remplacement et augmente avec le temps [Gómez, 2002] [Domingo-Cabo *et al.*, 2009]. [Domingo-Cabo *et al.*, 2009] ont réalisé une étude expérimentale sur le retrait et le fluage du béton produit en remplaçant les granulats naturels par des granulats recyclés provenant des déchets de construction et des démolitions de béton. Ils ont déterminé les variations de fluage et de retrait des bétons recyclés contenant 20%, 50% et 100% d'agrégats recyclés. Ils ont constaté que l'évolution de la déformation de retrait et fluage était similaire à celle d'un béton conventionnel. Les auteurs ont aussi montré qu'à partir de 180 jours, l'influence du taux de substitution des granulats naturels par des granulats recyclés était plus significative, notamment à 100% de remplacement, d'où il résulte une déformation de 51% due au fluage et de 70% due au retrait.

[Fathifazl *et al.*, 2011] ont étudié les caractéristiques du fluage et du retrait de séchage d'un béton produit avec des granulats grossiers de bétons recyclés afin de proposer une nouvelle méthode de formulation. Basé sur cette nouvelle méthode, les auteurs ont montré que les valeurs de fluage et de retrait des bétons à base de granulats grossiers de bétons recyclés sont comparables ou même inférieures à celles des bétons constitués d'agrégats naturels. Ils ont aussi démontré que le facteur de mortier résiduel proposé par les méthodes ACI et CEB pour calculer le fluage ou le retrait du béton conventionnel pourrait également être appliqué pour prédire le fluage et le retrait des bétons à base de granulats grossiers de bétons recyclés. Ce facteur explique l'effet de la fraction volumique résiduelle du mortier dans le béton.

8) Développement des résistances :

a) Résistance à la compression des bétons aux granulats recyclés secs

La composition de granulats recyclés de béton peut affecter directement les propriétés mécaniques du béton. Les résultats des travaux réalisés sur le béton contenant des GR ont démontré que les diminutions sont appréciables et tendent à augmenter avec l'augmentation du taux de substitution [Fantous, 2015 ; Turcanu, 2017] dans le cas d'un béton conventionnel ($E/C = 0,45$) proportionné avec des taux de remplacement entre 20% et 50%. La diminution de la résistance à la traction à 28 jours de mûrissement est évaluée respectivement à 22,7% et 31,8%. De plus, celle à la flexion est estimée respectivement à 8,3% et 21,7%. Par ailleurs, la réduction de la résistance à la compression est évaluée respectivement à 15,9% et 22,5%, soit des diminutions appréciables qui tendent à augmenter avec l'augmentation du taux de substitution [Fantous, 2015]. La résistance à la

compression du béton n'est significativement affectée que lorsque le taux de substitution dépasserait 45%. Dans ce cas, la résistance tend à diminuer. Néanmoins, les ajouts cimentaires pourraient compenser cette diminution [Wen *et al.*, 2014]. Plusieurs chercheurs ont observé des différences au niveau du développement de la résistance de béton aux granulats recyclés par rapport au béton fabriqué avec des granulats naturels. Certains chercheurs ont observé que les bétons ayant un taux de substitution de GR élevé ont des résistances à la compression à jeune âge plus élevée qu'un béton sans GR [Etxeberria *et al.*, 2007 ; Chakradhara Rao 2011]. Saadani a trouvé que les résistances à la compression sont nettement favorisées par la classe des granulats recyclés quel que soit le taux de substitution utilisé [Saadani, 2006]. D'autres chercheurs ont, cependant, observé des résultats opposés. Selon Meftah *et al.*, un gain de résistance à 28 jours des bétons contenant 20% et 40% des granulats recyclés supérieurs que les bétons témoins. Les bétons ayant un taux de remplacement entre 50% et 100% donnent des résistances moindres que les bétons témoins [Maftah *et al.*, 2011]. D'autres recherches sur des bétons aux granulats recyclés fabriqués avec un ciment à usage général (GU) montrent que des bétons contenant des granulats recyclés donnent des propriétés mécaniques plus faibles que des bétons fabriqués avec des granulats naturels [Boulay, 2014 ; Fantous, 2015 ; Turcanu, 2017].

b) Résistance à la compression et à la traction des granulats recyclés humidifiés dans les bétons

Une étude rapporte une synthèse des recherches sur les bétons aux GR pour différents taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés de 0, 20, 40, 60, 80 et 100% à plusieurs états de saturation des granulats recyclés (l'état sec, pré-mouillée et à l'état totalement saturé), que les bétons aux gros granulats recyclés secs développent des résistances à la compression supérieures par rapport au mélange témoin (0 % granulats recyclés) pour les taux de substitution de 20 et 40%. Au-delà de 40% de granulats recyclés, les résistances sont moindres par rapport au mélange témoin et ceci est probablement lié aux caractéristiques intrinsèques des granulats recyclés [Maftah *et al.*, 2011].

Les Figures (15 et 16) montrent les résultats de la résistance à la compression et à la traction à 28 jours de durcissement en fonction du taux de remplacement des granulats recyclés et leur humidification [Maftah *et al.*, 2011].

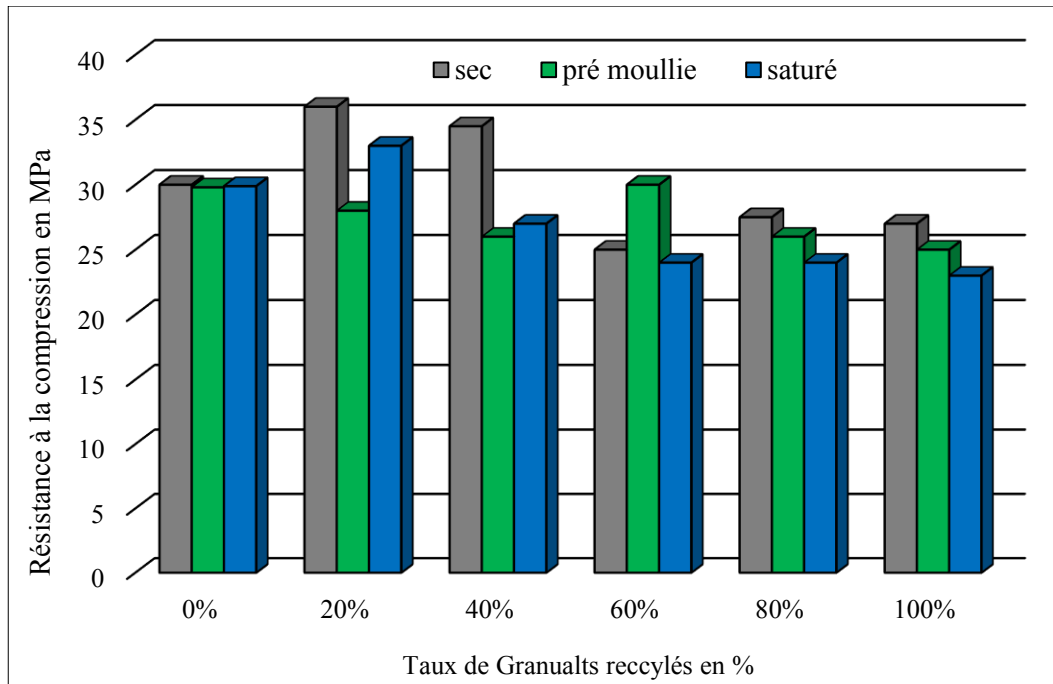


Figure 15 : Résistance à la compression à 28 jours [Maftah et *al.*, 2011]

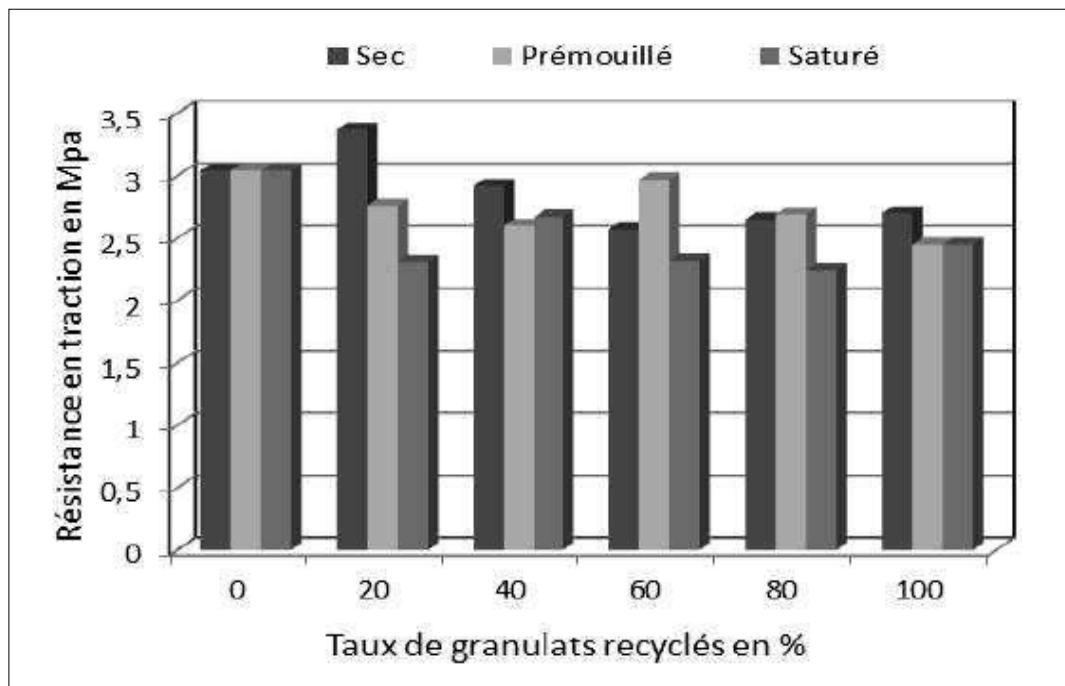


Figure 16 : Résistance à la traction par fendage à 28 jours [Maftah et *al.*, 2011]

Selon les travaux de Meftah et Arabi (2011) sur la résistance à la compression et à la traction des granulats recyclés humidifiés dans les bétons, l'utilisation d'un granulats recyclés à l'état sec semble donner de meilleures résistances à la compression et à la traction que s'ils étaient pré-mouillés ou

totalelement saturés. Cette dernière option peut compromettre les résistances si les mélanges sont proportionnés avec des teneurs en granulats recyclés importantes. Ils ont déterminé que l'utilisation des granulats recyclés à l'état sec garanti des bonnes résistances avec une limite de substitution jusqu'à 40%, et pour des taux de remplacement dépassant 40%, la supériorité de l'utilisation des granulats recyclés à l'état sec n'est pas mise en évidence de manière claire. Pour cette teneur et moins en granulats recyclés à l'état sec, le surplus d'eau de gâchage est absorbé par les granulats recyclés et les bétons étudiés ont tendance à avoir une maniabilité plus faible et une meilleure résistance [Maftah *et al.*, 2011]. Forte présence des granulats recyclés à l'état sec dans béton affecte plusieurs paramètres, chute de maniabilité, caractéristiques physiques et mécaniques moindres. Par ailleurs, le béton fabriqué avec des granulats recyclés à l'état saturé donne une bonne maniabilité, mais des propriétés mécanique plus faible à cause d'une quantité d'eau en excès [Maftah *et al.*, 2011].

Les résistances à la compression et à la traction diminuent avec l'inclusion des granulats recyclés dans la composition du béton. Les granulats naturels peuvent être remplacés par des granulats recyclés à faible taux de remplacement inférieur à 40% sans qu'il y ait de risque de perte de propriétés mécaniques [Maftah *et al.*, 2011].

La Figure 17 présente les fractures topographiques des bétons aux GR avec différents taux de remplacement.

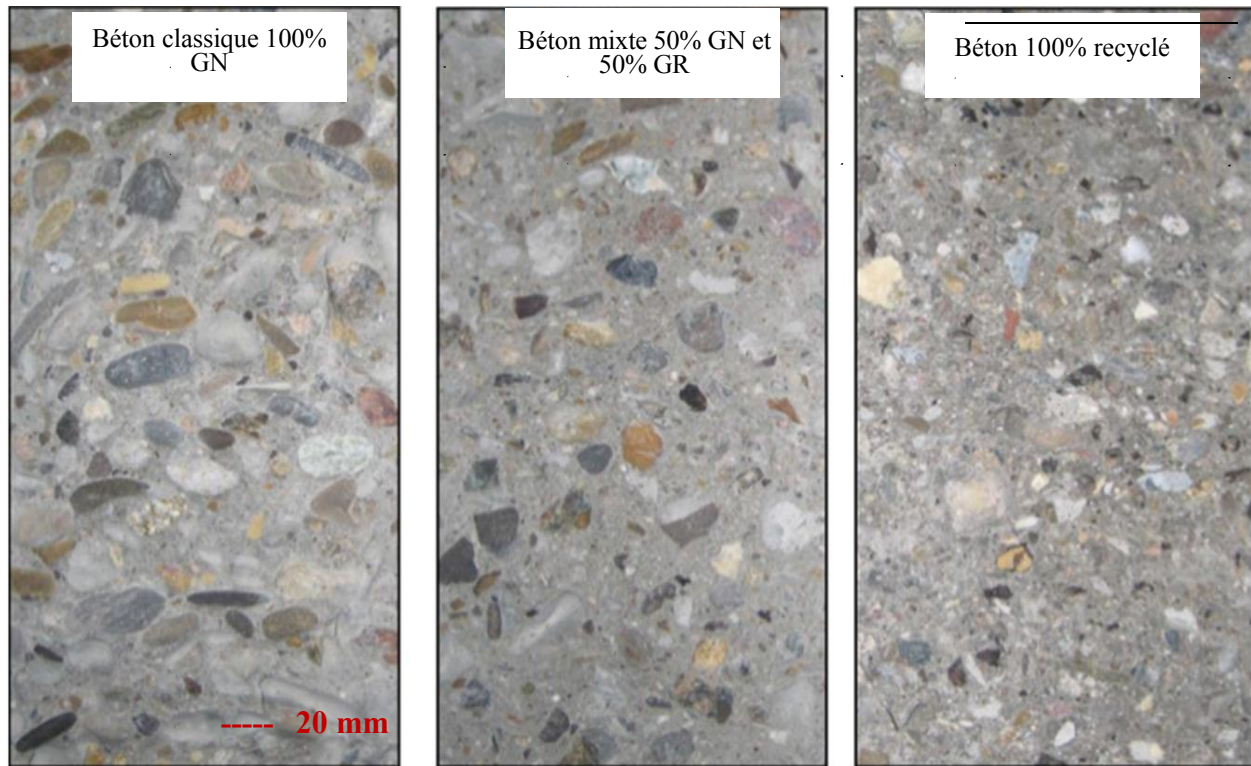


Figure 17 : Fractures topographiques des bétons aux GR [Braymand, 2013]

2.6 Retrait du béton

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles verticale et horizontale pendant ou après la prise des bétons. Il s'agit d'une déformation que subit le béton lors de l'hydratation du ciment. Cette déformation ne permet pas alors l'utilisation optimale de ce matériau [Aïtcin et coll., 1998]. Ces variations donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces. Le béton subit plusieurs types de retrait qui varient en fonction de la formulation du béton, la teneur et le type de liant, le rapport E/C, les teneurs des matériaux entrants dans la composition du béton, le mode de mûrissement, l'âge et les conditions d'utilisation. Les différents types de retraits sont : retrait plastique, retrait thermique, retrait de carbonatation, retrait de séchage, retrait endogène et retrait total (Figure 18). Le Tableau 5 présente la comparaison entre le retrait d'un béton ordinaire avec un rapport E/C élevé et celui d'un béton de haute performance de rapport E/C inférieur à 0,40.

Tableau 6 : Comparaison entre le retrait d'un béton ordinaire et celui d'un béton de haute performance (endogène et séchage) [Piécard et Dieryck, 2004]

Types de bétons	Rapport E/C	Retrait de séchage	Retrait endogène
Béton ordinaire	= 0,5	Élevé	Peu ou pas du tout
BHP	< 0,4	Faible	Élevé

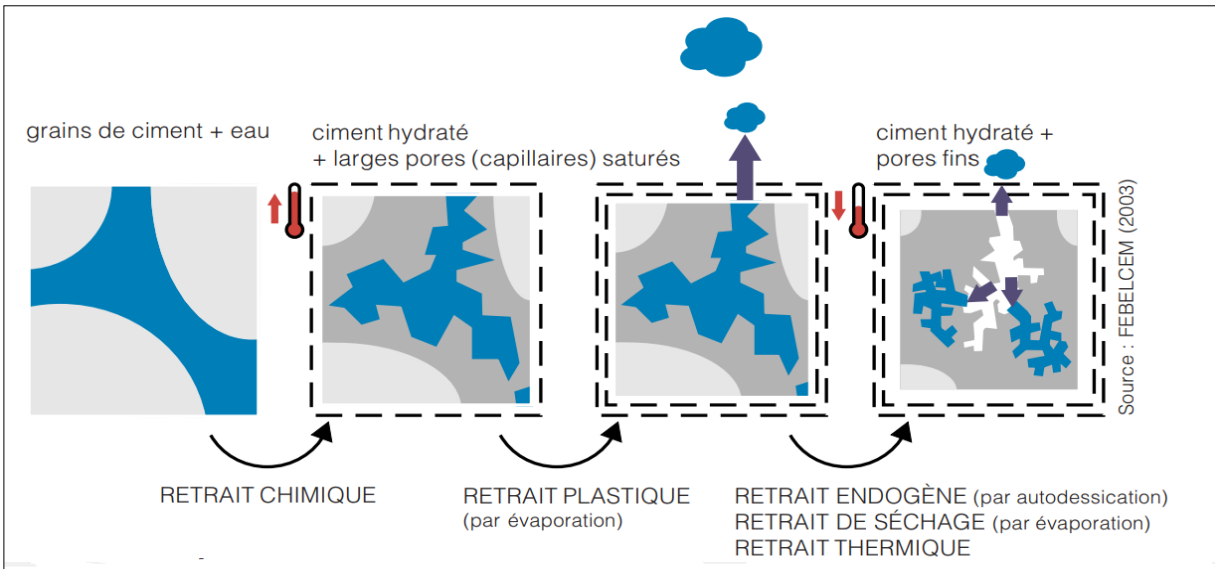


Figure 18 : Principaux types de retrait du béton. [Piécard et Dieryck, 2004]

2.6.1 Retrait plastique

Le retrait plastique caractérise le changement de volume se produisant avant le durcissement du béton [Steven H *et al.*, 2011]. Ce changement est dû à l'évaporation de l'eau de la surface du béton à l'état frais après la mise en place. C'est un phénomène de dessiccation avant et pendant la prise du béton [Détriché, 1992]. Ce phénomène est causé par une évaporation d'eau trop rapide en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface (i.e. ressuage). Il résulte une forte contraction dans la pâte qui crée des fissures sur la surface externe [Apaya, 2011].

2.6.2 Retrait thermique

L'hydratation du ciment est une réaction exothermique qui dégage une grande quantité de chaleur, notamment dans des éléments massiques, durant les premières heures [Steven H *et al.*, 2011]. Aïtcin *et. al.*, en 1997 expliquent le retrait thermique comme étant une contraction thermique causée par le dégagement de la chaleur d'hydratation du ciment.

2.6.3 Retrait de séchage

Le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation [Aïtcin *et al.*, 1997]. Il commence pendant l'évaporation de l'eau qui se trouve à l'intérieur du béton. Alors le facteur essentiel du retrait de séchage est l'évaporation de l'eau contenue dans les pores capillaires du béton exposé à l'air. Les forces de tension sont développées à l'intérieur du béton dans les ménisques. Cette tension entraîne

une contraction dans le béton. Le retrait de séchage dépend de plusieurs paramètres, notamment le rapport E/C, la teneur et le type de ciment. Le retrait de séchage est élevé dans les bétons ordinaires ayant un rapport E/C élevé, car le béton ordinaire contient une quantité d'eau importante que celle qui est nécessaire pour une hydratation complète du ciment. Cette quantité d'eau peut s'évaporer lorsque le béton se trouve en contact avec un milieu dont l'humidité relative est inférieure à celle du béton. Par ailleurs, le retrait de séchage est faible dans les bétons ayant un faible rapport E/C.

2.6.4 Retrait endogène

Le retrait endogène se produit surtout avec les bétons proportionnés avec un rapport Eau/Ciment ou Eau/Liant faible et une teneur des fines élevée. Ce phénomène est appelé aussi auto dessiccation ou dessiccation interne. Ce processus entraîne des pressions capillaires qui conduisent à un retrait rapide dans toute la masse du béton [Piécard et Dieryck, 2004].

Le retrait endogène a deux origines : le premier est chimique « la contraction Le Chatelier » et le deuxième est physique appelé retrait d'auto-dessiccation. La dépression capillaire provoquée par la contraction (Le Chatelier) génère une contrainte dans la phase solide de la matrice cimentaire et engendre donc une déformation (changement de volume). Dans ce cas, la diminution du volume est appelée retrait d'auto dessiccation. Dans un milieu scellé (aucun contact entre l'atmosphère et le béton), le retrait endogène est un retrait chimique relié directement à la réaction d'hydratation du ciment [Piécard et Dieryck, 2004].

Le retrait endogène d'origine physique est une conséquence de la contraction Le Chatelier. Il ne peut se produire que si le béton est scellé (aucun échange hydrique avec l'environnement). Le retrait endogène est élevé dans les bétons de haute performance ayant un rapport E/C faible, et moins élevé dans les bétons ayant un rapport E/C faible. La Figure 19 présente l'évolution du retrait endogène en fonction du rapport E/C.

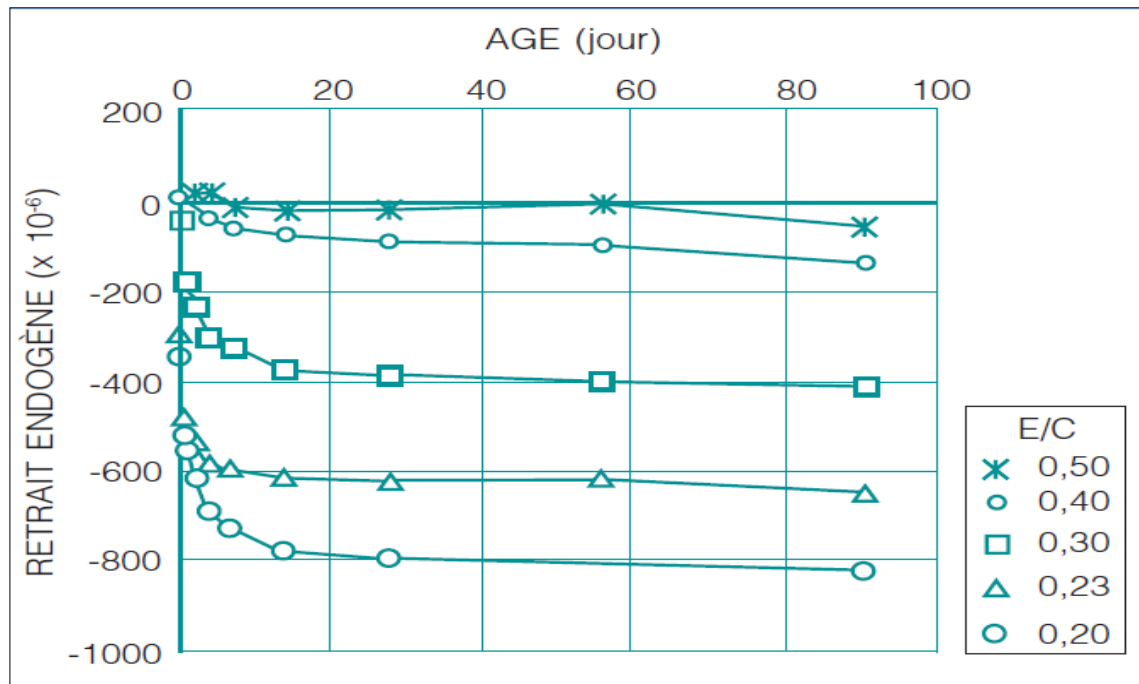


Figure 19 : Évolution du retrait endogène en fonction de E/C ($\mu\text{m/m}$) [Tazawa et Miyazawa, 1997 ; Piécard et Dieryck, 2004]

Il n'existe pas une méthode précise pour mesurer le retrait endogène. Il y a plusieurs méthodes utilisées pour déterminer la variation d'allongement de béton ou de mortier :

Utilisation de la corde vibrante :

Il s'agit d'installer une corde vibrante dans la poutre avant le coulage de béton. La corde est connectée à un ordinateur et l'enregistrement se fait automatiquement dès que le béton commence à durcir. La poutre est emballée par un film d'aluminium autocollant isolant (Figure 20). Le système d'acquisition de données permet l'enregistrement de la variation d'allongement du béton et de la température du béton à différents âges.

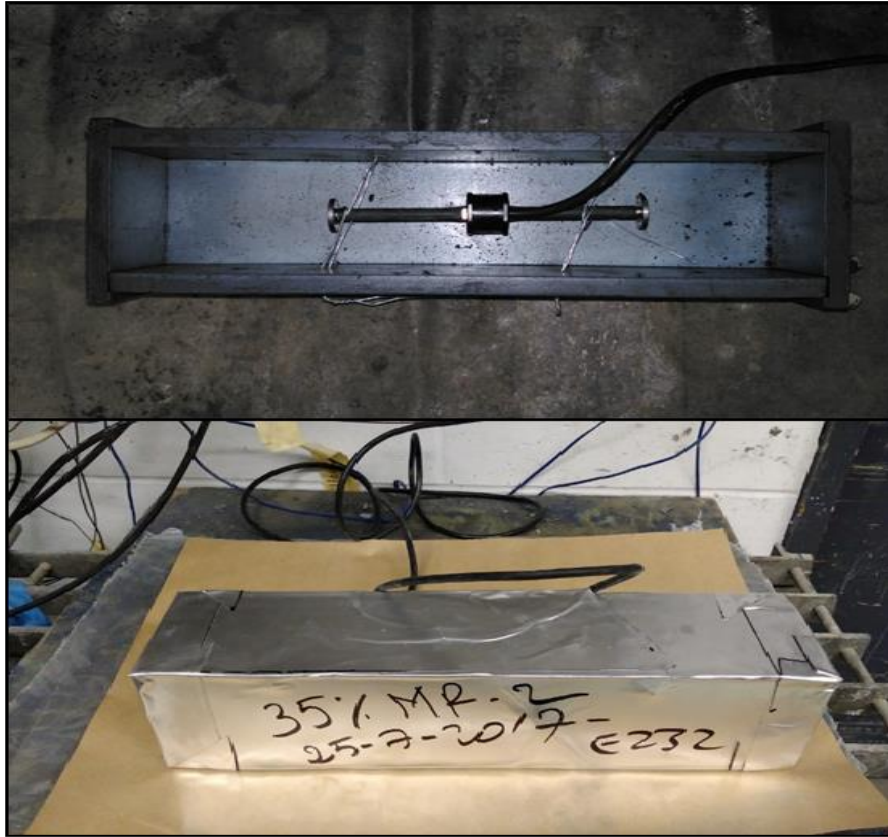


Figure 20 : Mesure linéique du retrait endogène avec la corde vibrante

Avec déformètre :

Le retrait endogène peut être déterminé avec le même procédé expérimental que le retrait de séchage, mais en empêchant tout départ de l'eau des bétons fraîchement coulés. Cette méthode est très simple et moins coûteuse, sauf que la poutre doit être emballée par un film d'aluminium autocollant isolant ou recouverte de peinture époxy. Juste après le démoulage, aucun contact entre le béton et atmosphère n'est toléré. Cette méthode a été déjà utilisée dans les travaux de Wolters en 2010 à l'Université de Liège (Figures 21 et 22). Pour pouvoir mesurer le retrait endogène seul, il faut éliminer toutes les autres composantes du retrait total, notamment le retrait de séchage. On respecte deux conditions expérimentales : le béton après coulage doit être isolé de tout échange d'humidité avec l'extérieur et doit être conservé dans une condition isotherme (humidité et température contrôlées). Avec ces deux conditions, la mesure du retrait endogène doit commencer le plus tôt possible après le bétonnage [Piécard et Dieryck, 2004]. La mesure linéique du retrait endogène consiste à mesurer la variation dimensionnelle d'une éprouvette dans un seul sens. La valeur est exprimée selon la formule suivante :

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \text{Équation (2)}$$

Où

L : Longueur de l'éprouvette au moment de la mesure.

L₀ : Longueur initiale à T₀ (la première mesure après le coulage du béton).

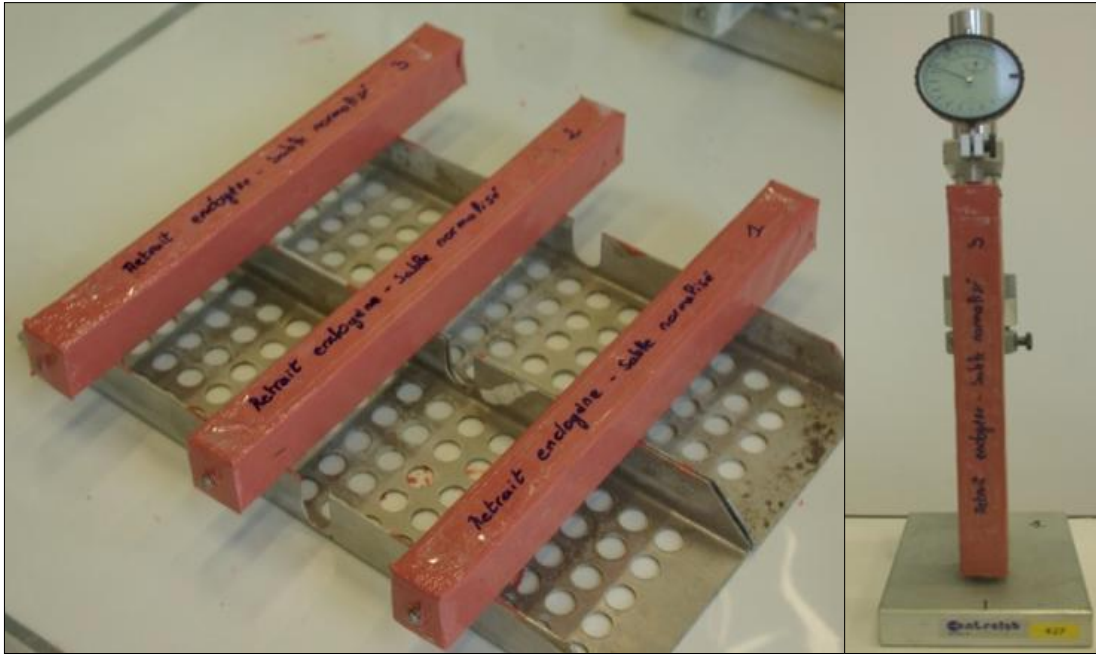


Figure 21 : Eprouvettes recouvertes de peinture époxy / Déformètre [Wolters, 2010]

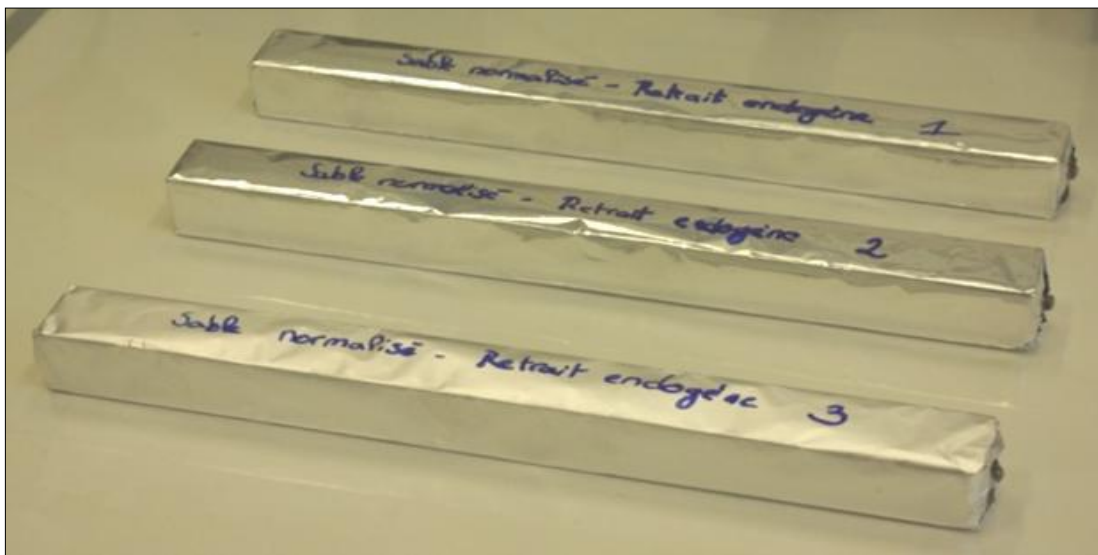


Figure 22 : Éprouvettes sous film d'aluminium [Wolters, 2010]

2.6.5 Retrait total

Selon [Piécard et Dieryck, 2004], la déformation totale du béton ($\epsilon_{\text{retrait total}}$) est composée de deux parties principales. La première est la déformation due au retrait de séchage ($\epsilon_{\text{retrait de séchage}}$) et la deuxième est due au retrait endogène ($\epsilon_{\text{retrait endogène}}$). Le retrait de séchage se développe lentement, car il est fonction de l'évaporation de l'eau au travers du béton durci. Le retrait endogène se développe pendant le durcissement du béton : il se produit dans les premiers jours qui suivent le coulage. La déformation totale du béton peut être calculée par la relation suivante :

$$\epsilon_{\text{retrait total}} = \epsilon_{\text{retrait de séchage}} + \epsilon_{\text{retrait endogène}} \quad \text{Équation (3)}$$

Où :

$\epsilon_{\text{retrait de séchage}}$: Déformation due au séchage du béton (retrait de séchage).

$\epsilon_{\text{retrait endogène}}$: Déformation due au retrait endogène.

$\epsilon_{\text{retrait total}}$: Déformation totale du béton (retrait total).

2.7 Mûrissement

Une fois le béton mis en place, il reste déformable (à l'état plastique) tant que la prise n'est pas encore terminée. L'évaporation trop rapide de l'eau d'un béton frais peut créer de la fissuration. Ce phénomène est appelé dessiccation. Le but de la cure est la protection du béton. Il s'agit notamment de fournir au béton aussitôt après sa mise en place des conditions favorables d'humidité et de température afin qu'il puisse atteindre les exigences de qualité spécifiées, notamment le cas des bétons à haute performance (BHP, BUHP et BAP) [CSA A23.4 -09].

2.7.1 Durée de la cure

La durée de cure requise dépend principalement du temps nécessaire pour l'obtention d'une certaine imperméabilité et d'autres caractéristiques. Elle est également liée au développement de la résistance du béton ainsi qu'aux exigences de durabilité posées (classes d'exposition et type de béton). D'autres facteurs ont aussi un rôle sur la durée de la cure, comme le type de liant utilisé dans la formulation du béton, le rapport E/L, la teneur en liant, la température du béton et les conditions climatiques de durcissement [Pollet et Jacobs, 2004]. Par ailleurs, les ciments qui développent une résistance très rapidement sont moins sensibles à la cure que les ciments à prise lente et le temps de la cure pour ces ciments est plus long que pour un ciment GU.

Il existe quatre types de cure : la cure par aspersion d'eau (nappe d'eau ou arrosage d'eau continu), utilisation d'un géotextile humidifié, utilisation d'une feuille de polyane et produits de cure. Pour les produits de cure, il existe deux types. Les produits solvantés qui sont généralement composés d'une résine diluée dans un solvant et les produits de cure non-solvantés composés à base d'un polymère [Pollet et Jacobs, 2004]. Le Tableau 7 présente les types de cure recommandés par la norme CSA A23.2-09 en fonction du type de béton.

Tableau 7 : Régime de cure admissible selon l'association canadienne de la normalisation [A23.1-09/A23.2-09, 2011]

Type de cure	Nom	Description
1	Cure de base	3 jours à une température $\geq 10^{\circ}$ ou pendant le temps nécessaire pour atteindre 40% de la résistance spécifiée.
2	Cure supplémentaire	3 jours à une température $\geq 10^{\circ}$ ou pendant le temps nécessaire pour atteindre 70% de la résistance spécifiée. Avec l'utilisation de fumée de silice, on doit recourir à des méthodes de cure additionnelles.
3	Cure prolongée	Période de cure par voie humide de 7 jours, les types de cure acceptables sont les nappes d'eau, l'arrosage continu, les matériaux absorbants ou les toiles maintenues continuellement mouillées.

Il est recommandé que la cure des surfaces de béton préfabriqué doive être conforme à la CSA A23-4. Selon la même norme, il est conseillé de laisser le béton sécher à l'air durant une période d'au moins 30 jours après la fin de la cure, avant qu'il soit exposé à des produits chimiques, tels que les sels de déglacage.

2.7.2 Mûrissement interne

Le béton de dernière génération, tels que le béton à haute performance (BHP) et le béton autoplaçant (BAP), contient une teneur élevée en liant. Ces types de bétons sont sensibles au retrait endogène. Le développement du retrait endogène crée des fissures à jeune âge qui peuvent influencer sur les performances des BHP et des BAP. L'utilisation des granulats poreux, tels que les granulats légers saturés d'eau dans le béton, peut contribuer à un mûrissement interne dans le béton [Bentz *et al.*, 2005 ; Henkensiefken, 2008]. La saturation des granulats légers peut constituer un réservoir et fournir de l'eau à la matrice cimentaire. Selon [Lepesqueux, 2011] « l'eau absorbée par les granulats légers est relâchée lentement dans le béton permet une hydratation plus uniforme du ciment et fournit une cure interne au béton qui tend à diminuer la dessiccation et le retrait au

jeune âge ». D'après les études de [Looser *et al.*, 2009 ; Burcu, 2009], il est montré que le remplacement de sable naturel par des granulats légers fins donne un bon mûrissement que le remplacement des gros granulats naturels par des gros granulats légers.

Étant donné que le diamètre des particules de sable est inférieur à celui des gros granulats, ceci va permettre d'augmenter la surface de contact avec la pâte de ciment. Une bonne dispersion des particules de sable saturé dans le béton fournit un bon mûrissement interne, ce qui contribue à diminuer le retrait endogène [Breugel *et al.*, 2000]. Selon [Burcu, 2009], une substitution de 10 % de granulats légers dans le béton peut jouer un rôle significatif sur la réduction du retrait endogène. Par ailleurs, selon [Bentur, 2001], un taux de remplacement de 25% de granulats naturels par des granulats légers permettra une réduction totale du retrait endogène.

Selon l'Association Béton Québec, on peut appliquer une cure interne par ajout de granulats fins poreux (sable léger). Le mécanisme d'action est expliqué par le fait que le sable léger saturé en eau avant bétonnage agit comme une source d'eau pour compenser l'eau consommée lors de l'hydratation du ciment durant la période de mûrissement [Bédard, 2016]. La Figure 23 présente un schéma sur l'influence de la dimension du GL utilisé dans le transport de l'eau du GL saturé vers la pâte de ciment comparativement à la cure humide conventionnelle.

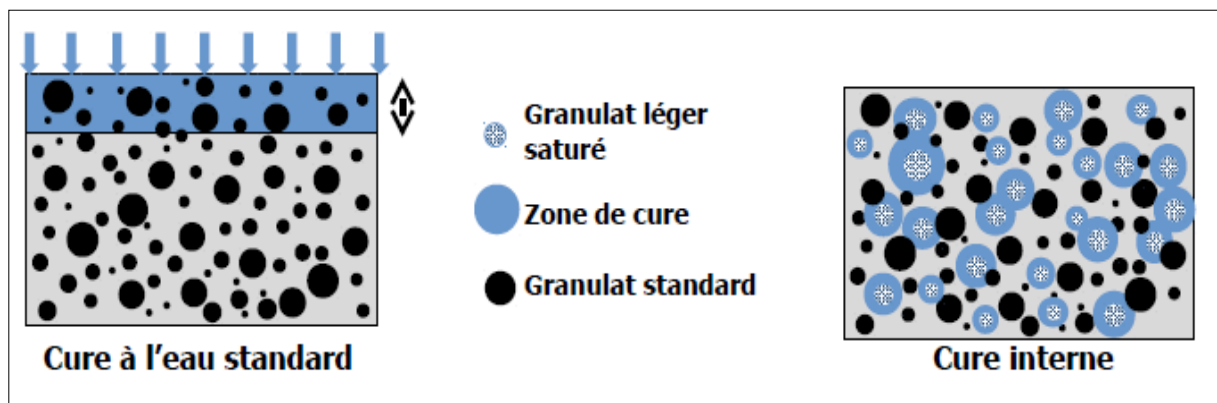


Figure 23 : Cure à l'eau et cure interne utilisant un GL saturé dans le transport de l'eau vers la pâte de ciment [Bédard, 2016]

Il est évident de formuler des bétons performant en utilisant des matériaux recyclés. Cependant, il est observé dans la littérature que l'utilisation des granulats recyclés affecte le comportement des bétons à l'état frais et les propriétés mécaniques. Ce phénomène est dû principalement à la présence de mortier résiduel attaché sur les granulats recyclés. Ce mortier est caractérisé par une forte absorption d'eau et une porosité élevée. Ainsi, les granulats recyclés sont classés comme granulats

poreux. On peut tout de même corriger ce facteur négatif (absorption) en effectuant une saturation des GR avant leur utilisation. Ceci pourrait constituer un paramètre positif contribuant à la cure interne de béton [Baofan, 2013]. Un granulats recyclés a une absorption élevée entre 5 à 10 %. Celle-ci servira comme une source d'eau interne dans le béton et permettra ainsi une meilleure hydratation de ciment à long terme et donne un meilleur gain de résistance au béton.

2.8 Béton autoplaçant

Le béton autoplaçant (BAP) a été développé par des chercheurs de l'Université de Tokyo au Japon à la fin des années 1980 [Okamura et Ouchi, 2003]. Le BAP offre plusieurs avantages techniques et socio-économiques liés à son utilisation [ACI 237 R, 2007]. On peut citer :

Les avantages techniques :

- Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures sans vibration dans des zones fortement ferraillées ;
- Maniabilité très élevée qu'un béton ordinaire ;
- Meilleures performances et durabilité (grande compacité) ;
- Meilleures propriétés mécaniques qu'un béton conventionnel vibré ;
- Amélioration des qualités esthétiques des parements et des surfaces ;
- Mise en place pratique et facile par un pompage.

Les avantages socio-économiques :

- Augmentation des cadences de production et minimisation du temps de mise en place ;
- Économie du coût global d'un projet ;
- Diminution de la difficulté du travail et amélioration des conditions de sécurité des ouvriers lors du bétonnage ;
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur, amélioration des conditions de travail sur le chantier, absence de nuisance sonore liée à la vibration et utilisation comme un béton de réparation ;
- Suppression des opérations coûteuses de la main-d'œuvre telle que consolidation du béton et surfacages.

Selon la norme [CSA A23.1], le BAP est un béton extrêmement fluide et stable. Il peut facilement être épandu (mise en place), remplit les coffrages et enrobe l'armature dans les zones fortement ferraillées, sans consolidation mécanique (vibration) et sans subir de séparation importante des

constituants. Généralement, son étalement est compris entre 500 mm et 800 mm avec une tolérance ± 70 mm [Bédard, 2016].

La formulation des BAP est relativement complexe et coûteuse par rapport à un béton conventionnel vibré. Une forte teneur en liant et un dosage important en superplastifiant pour assurer les propriétés de fluidité, d'homogénéité et de stabilité [ACI 237 R, 2007 ; Guide de béton, juin, 2017]. La Figure 24 présente les constituants des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants.

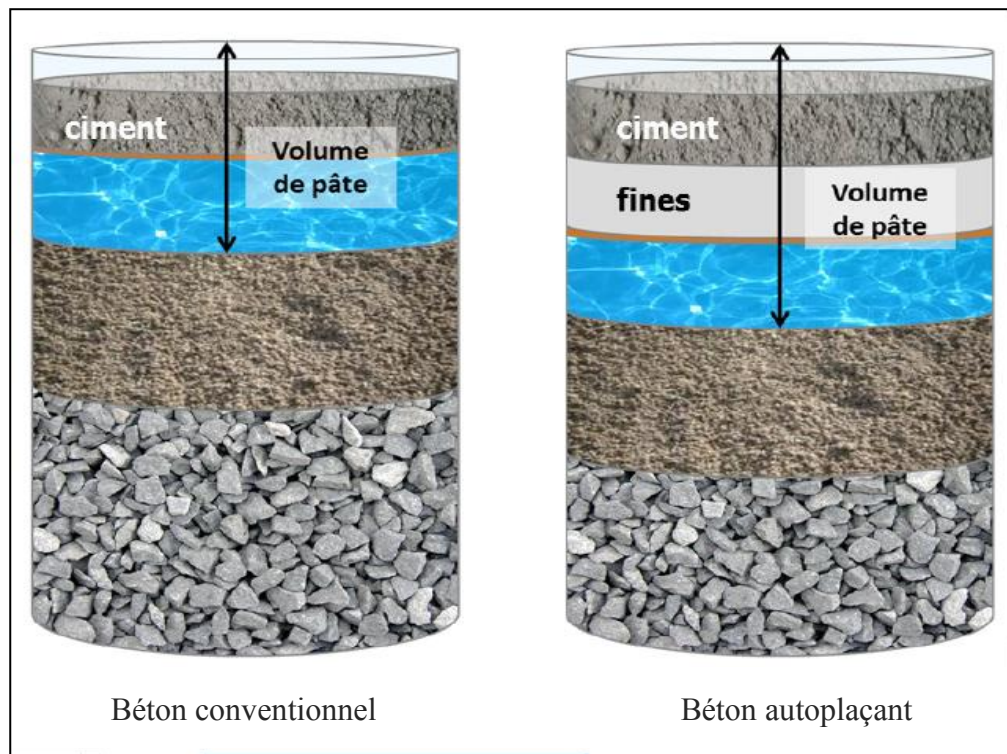


Figure 24 : Constituants des bétons ordinaires et des BAP [Association béton Québec, Luc Bédard, 2016]

2.8.1 Approches de formulation

Selon les recommandations du comité de l'American Concrete Institute (ACI 237 R) sur l'emploi des bétons autoplaçants et Association Béton Québec « ABQ », on peut distinguer trois scénarios de formulation des BAP :

- 1) Forte teneur en liant et utilisation de superplastifiant ;
- 2) Faible teneur en liant, utilisation de superplastifiant et d'agent de viscosité ;
- 3) Moyenne teneur en liant, utilisation de superplastifiant et une quantité limitée d'agents de viscosité, rapport E/L faible.

Le Tableau 8 présente les teneurs en poudre (kg/m^3) en fonction d'étalement.

Tableau 8 : Gammes de teneur en poudre suggérées [ACI 237R, 2007]

	Béton autoplaçants		
Étalement	< 550 mm	550 - 600 mm	> 650 mm
Teneur en poudre	355 à 385 (kg/m^3)	385 à 445 (kg/m^3)	> 458 (kg/m^3)

Le Tableau 9 présente les pourcentages des composants du béton autoplaçant.

Tableau 9 : Proportions des composants de BAP. [ACI 237R, 2007]

Volume total	Pourcentage (%)
Agrégats	28 à 32 %
Pâte	34 à 40 %
Mortier	68 à 72 %
Rapport E/L	0,32 à 0,45
Teneur en ciment	385 à 445 (kg/m^3)

Selon les recommandations de l'Association Française de Génie Civil « AFGC » (2008), les BAP sont classés en trois catégories en fonction de leur application. Le classement des BAP est effectué suivant leur écoulement et maniabilité. La première catégorie correspond aux BAP utilisés dans les ouvrages où les sections horizontales sont de faible épaisseur (épaisseur ≤ 300 mm et intervalle d'écoulement > 100 mm). La deuxième catégorie correspond aux BAP utilisés pour des applications horizontales de grandes épaisseurs (épaisseur > 300 mm et un intervalle d'écoulement ≥ 80 mm). La troisième catégorie correspond aux BAP pour des parties d'ouvrage exiguës ou fortement ferraillées et pour lesquelles l'intervalle d'écoulement < 80 mm. Les matériaux les plus utilisés dans les applications de réparation sont généralement les bétons autoplaçants. Le Tableau 10 présente les classes des BAP en fonction de leurs fourchettes d'étalement.

Tableau 10 : Classes de BAP en fonction de l'étalement [AFGC, 2008]

Classe	Étalement (mm)
BAP -1	550 à 650
BAP -2	660 à 750
BAP -3	760 à 850

2.9 Qualité d'adhérence des bétons de réparation

On dit d'un élément structural en béton réparé est durable s'il est capable de résister aux sollicitations en service en conservant son intégrité jusqu'à l'atteinte de sa durée de vie. La performance d'un système de réparation est étroitement liée à la qualité de l'adhérence entre le matériau de réparation utilisé et l'ancien. Quant à la compatibilité de la zone de transition (interface substrat-réparation) entre l'ancien et le nouveau béton, elle est directement conditionnée par les propriétés des deux matériaux reliés. La qualité interface (substrat-réparation) entre l'ancien et le nouveau béton joue un rôle nécessaire dans la durabilité de l'ensemble du système [Modjabi-Sangnier, 2010]. La qualité de l'adhérence de la réparation est mesurée par des essais mécaniques de traction directe ou indirecte (Figure 25) :

- a) Essais de traction directe et indirecte par fendage cylindrique et cubique ;
- b) Essais sous état de contraintes combinées de cisaillement et de compression ;
- c) Essais de cisaillement direct.

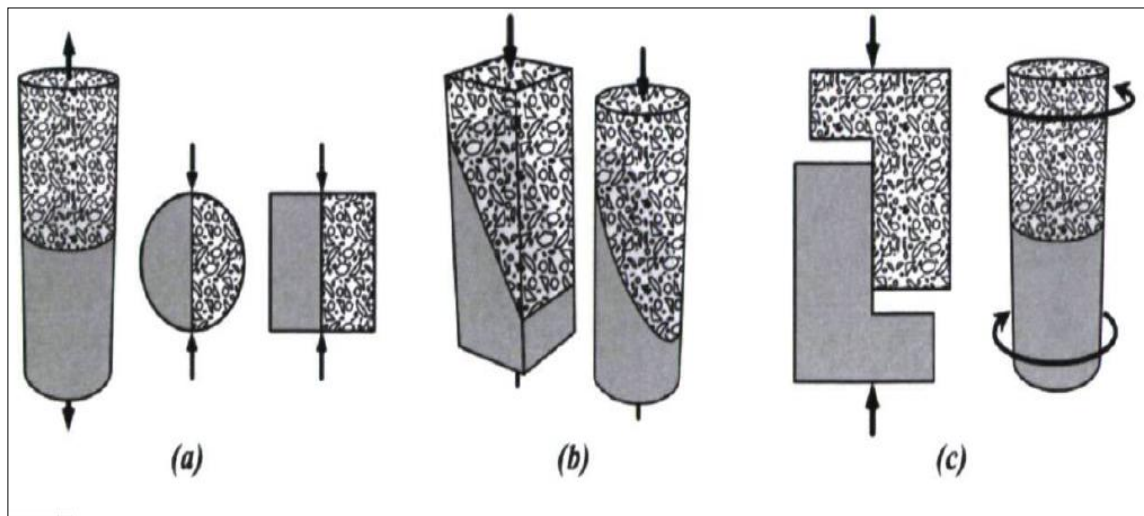


Figure 25 : Différentes catégories d'essais mécaniques pour évaluer l'adhérence [Modjabi-Sangnier, 2010]

CHAPITRE 3 **PROGRAMME EXPÉRIMENTAL ET PROCÉDURES D'ESSAIS**

Dans ce chapitre, nous présentons le programme expérimental, les procédures expérimentales, et les formulations des BAP étudiés. Nous décrivons les matériaux utilisés et nous présentons aussi les différents protocoles de préparation des matériaux.

3.1 Programme expérimental

L'étude expérimentale porte sur l'évaluation de l'effet de l'utilisation des granulats recyclés de type MR-2 sur la maniabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP. Il s'agit notamment d'étudier l'influence des taux de remplacement des granulats recyclés (0%, 20%, 35% et 50%) et de leur état de saturation (saturés et secs). Par ailleurs, l'influence de ces granulats sur le mûrissement interne des BAP à faible rapport eau/liant (E/L de 0,35) sera évaluée. Le programme expérimental est composé de quatre différentes phases :

Phase I : Identification, conditionnement et caractérisation des matériaux recyclés

La première phase est consacrée à la caractérisation des matériaux afin d'identifier les propriétés des granulats recyclés de classe MR-2. Les essais réalisés dans le cadre de cette phase comprennent plusieurs essais normalisés sur des granulats (tamisage des granulats de type MR-2, analyse granulométrique, la densité, absorption et cinétique de l'absorption).

Phase II : Étude paramétrique sur le béton autoplaçant ($E/C = 0,35$ et un liant du type TerC³)

Après la première phase qui a servi à déterminer les caractéristiques des GR et leur optimisation granulaire, nous évaluerons dans la seconde phase le comportement des BAP aux GR avec différents taux de remplacement à l'état frais, durci et leur durabilité. La deuxième phase est composée de deux parties :

- A) La première partie consiste à optimiser la formulation des bétons autoplaçants de référence proportionnée avec 100% de granulats naturels. Il s'agit également d'optimiser le squelette granulaire par la courbe de Fuller-Thompson.
- B) La deuxième partie consiste à évaluer l'effet du taux de remplacement (20%, 35% et 50%) de GR de type MR-2 (0-20 mm) totalement saturé.

Dans le cadre de cette partie (Phase II), des mélanges de BAP ont été confectionnés dans le but d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres sur les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques et la durabilité. Les essais effectués sont les essais sur des BAP frais (demande en SP, étalement, T_{50} , J-ring, masse volumique et teneur en air) ainsi que les essais sur BAP durci (résistance à la compression, résistance à la traction, résistance en flexion, module d'élasticité et le fluage à la compression) et des essais de durabilité (résistivité électrique, résistance aux ions de chlore, résistance à l'écaillage et qualité d'adhérence BAP réparé avec 35 % MR-2 (0-20 mm) saturé et BAP de référence). Tous les BAP sont formulés en utilisant un même type de superplastifiant et des dosages optimisés pour atteindre l'étalement visé. Les paramètres de formulation pour tous les BAP de référence et les BAP aux GR sont :

- Rapport E/L = 0,35 (massique),
- Rapport S/(S+G) = 0,5 (volumique),
- Volume de pâte de 350 L/m³,
- Teneur en liant = 420 kg/m³,
- Teneur en air entre 5 et 8%,
- Teneur en gros granulats de 33,5%,
- Type de ciment TerC³,
- Diamètre maximal des granulats utilisés est de 20 mm.

Phase III : Effet de l'état de saturation des GR et du type de liant pour un BAP de 35% MR-2 et un rapport E/L = 0,35

La troisième phase est composée de deux parties :

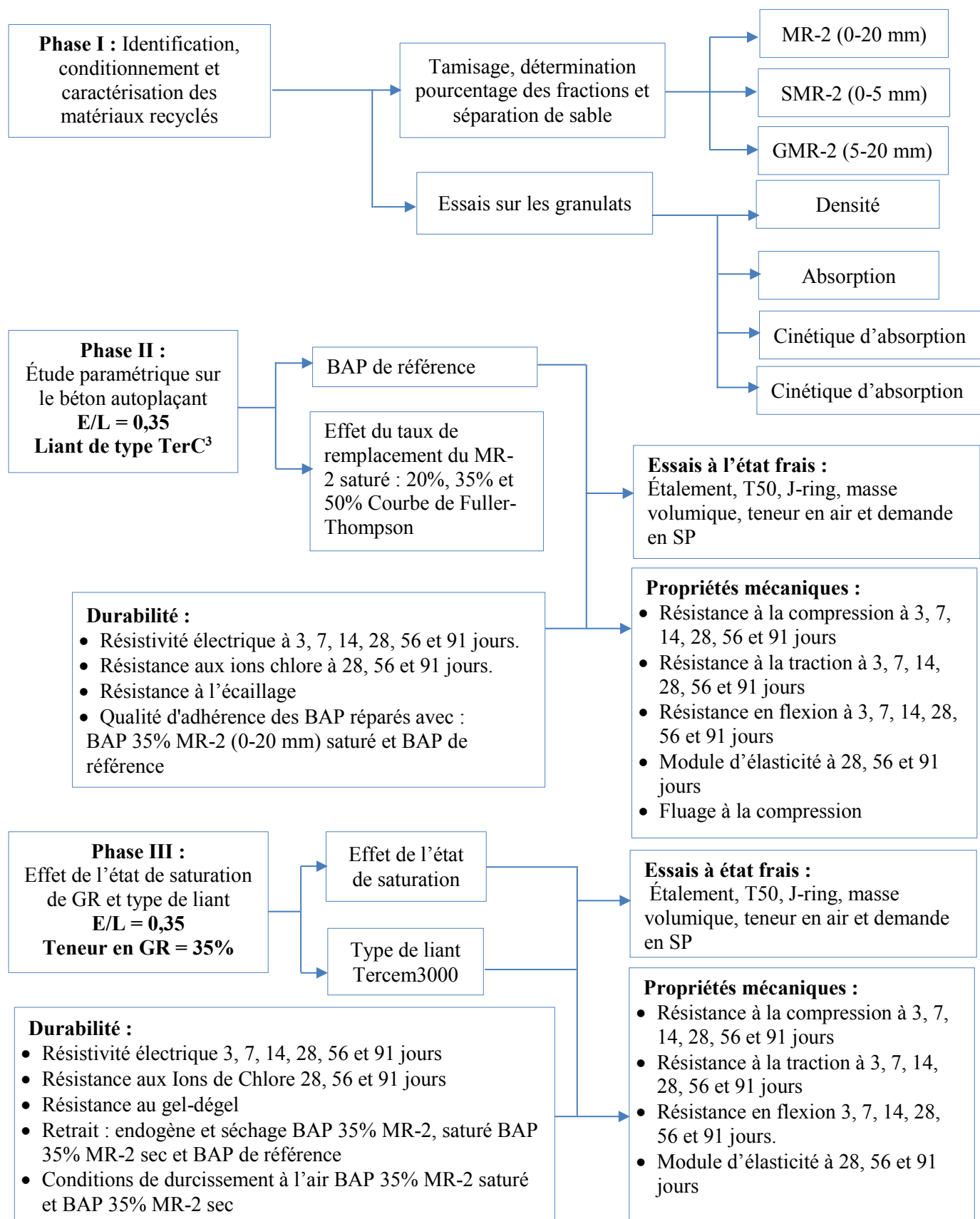
La première partie de cette Phase porte sur l'effet de l'état de saturation du granulat recyclé sur les propriétés de BAP proportionné avec un taux de remplacement de 35 % MR-2 (0-20 mm) et différents états de saturation (totalement saturé et sec). Le premier BAP étudié est un béton fabriqué avec un GR saturé et optimisé dans la deuxième phase. Le deuxième BAP est fabriqué avec le même taux de remplacement de GR à l'état sec. Les essais effectués sont les essais sur des BAP frais (étalement, T_{50} , J-ring, masse volumique, teneur en air et demande en SP), ainsi que les essais pour déterminer les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, résistance en flexion et module d'élasticité) et des essais de durabilité (résistivité électrique, résistance aux ions chlore, retrait endogène et retrait de séchage).

La deuxième partie de cette Phase porte sur l'effet du type de liant sur les propriétés de BAP contenant une teneur donnée en MR-2 à l'état saturé. Les BAP étudiés sont fabriqués avec deux ciments ternaires TerC³ et Tercem3000.

Phase IV : Effet de fraction fine recyclé sur les propriétés du BAP

Après les trois premières phases qui nous permettront de déterminer l'effet de l'état de saturation des GR sur les propriétés des BAP, nous allons examiner l'effet de remplacement des GR saturés séparément sur les propriétés des BAP à l'état frais, durci et la durabilité Phase (IV). La formulation des BAP étudiée est la même que celle étudiée dans la Phase (II), sauf que le remplacement des MR est différent. Deux différentes formulations de BAP sont confectionnées avec le même taux de remplacement. Les BAP fabriqués avec du sable recyclé et des BAP avec de gros granulats recyclés.

L'organigramme ci-après résume les phases expérimentales ainsi que les essais à réaliser.



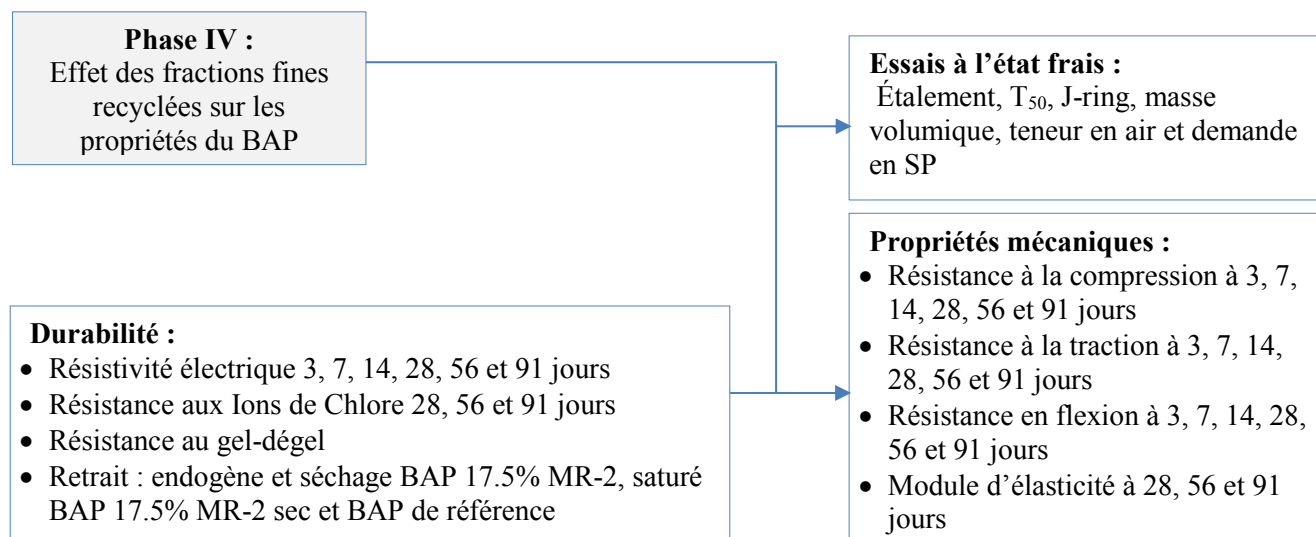


Figure 26 : Organigramme des phases expérimentales

3.2 Normes utilisées :

Les normes CSA A23.1-09/A23.2-09 (Association canadienne de normalisation) et ASTM (la norme nord-américaine) sont utilisées pour caractériser les matériaux utilisés et les propriétés des BAP étudiés. Les essais effectués au cours de cette étude sont présentés dans le tableau 11.

Tableau 11 : Norme ASTM utilisée

Normes des essais	Normes ASTM
Analyse granulométrique	C136/C136M – 14
Densité relative et absorption de l'agrégat fine	C128 – 15
Étalement	C1611/C1611M – 14
J-Ring	C1621/C1621M – 17
Teneur en air	C138/C138M – 16
Masse volumique	C138/C138M – 16
Compression	C39/C39M – 16
Traction par fendage	C496/C496M – 11
Flexion	C78/C78M – 16
Module d'élasticité E	C469/C469M – 14
Fluage	C512/C512M – 15
Retrait séchage	C157/C157M – 17
Retrait endogène	C157/C157M – 17
Gel-dégel	C666/C666M – 15
Écaillage	C672/C672M – 12
Perméabilité aux ions de chlorure	C1202 – 17
Résistivité	C1760 – 12

3.3 Matériaux utilisés

3.2.1 Ciment

Deux types de ciment sont utilisés dans le cadre de cette étude :

- Un ciment composé GUb-F/SF (TerC³) composé de 70 % de GU, 25 % de cendres volantes et 5 % de fumée de silice ;
- Un ciment composé GUb-S/SF (Tercem3000) composé de 73 % de GU, 22 % de laitier et 5 % de fumée de silice.

3.2.2 Les granulats naturels

Trois types de granulats naturels (GN) sont utilisés dans les formulations des bétons autoplaçants : diamètre maximal 5 mm, 10 mm et 14 mm, Les granulats sont respectivement identifiés sable (0-5 mm), GGN (5-10 mm) et GGN (10-14 mm). Des essais d'identification sont effectués à chaque arrivage. Les procédures de la norme CSA A23.2-12A sont utilisés pour déterminer la densité et l'absorption. Les résultats pour chaque type de granulats naturels sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Densité, absorption et module de finesse des matériaux naturels

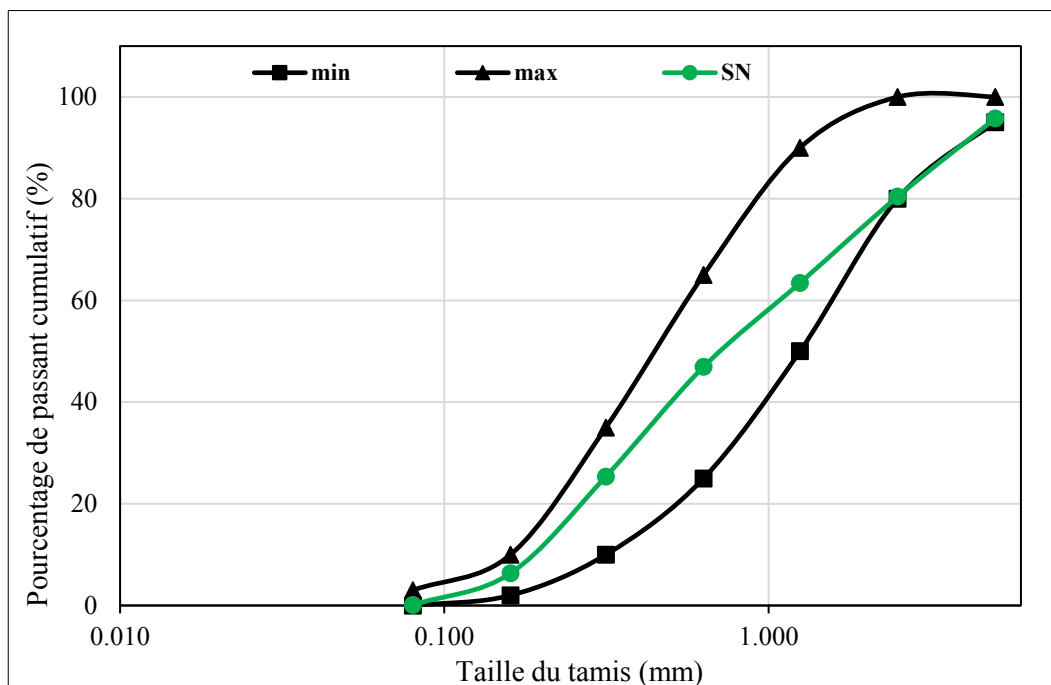
Type de granulats	Pierre 5-14 mm	Pierre 5-10 mm	Sable
Densité brute (Db)	2,72	2,77	2,63
Densité SSS (Dsss)	2,73	2,78	2,66
Densité apparente (Da)	2,75	2,81	2,71
Module de fines Mf	/	/	2,82
Absorption (%)	0,46	0,41	1

3.2.2.1 Sable

D'après les résultats de caractérisation, on observe que le sable naturel a une masse volumique de 2,68 à l'état saturé surface sèche (SSS), une absorption (Abs) de 1 % et un module de finesse de 2,70. Masse volumique et l'absorption sont déterminées conformément à la norme CSA 23.2, alors que l'analyse granulométrique est effectuée suivant les normes CSA 23.1 et CSA 23.2-2A (Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton). La granulométrie du sable naturel et le fuseau normalisé de la norme CSA sont présentés dans le tableau 13 et illustrés à la figure 27.

Tableau 13 : Granulométrie du sable naturel

Granulats fins (Sable 0-5 mm)		Fuseau normalisé CSA	
Tamis (mm)	Tamises cumulés (%)	Min	Max
10	100,00	100	100
5	95,77	95	100
2,5	80,40	80	100
1,25	63,44	50	90
0,630	46,93	25	65
0,315	25,38	10	35
0,160	6,34	2	10
0,080	0,12	0	3
PLAT	0,00	/	/

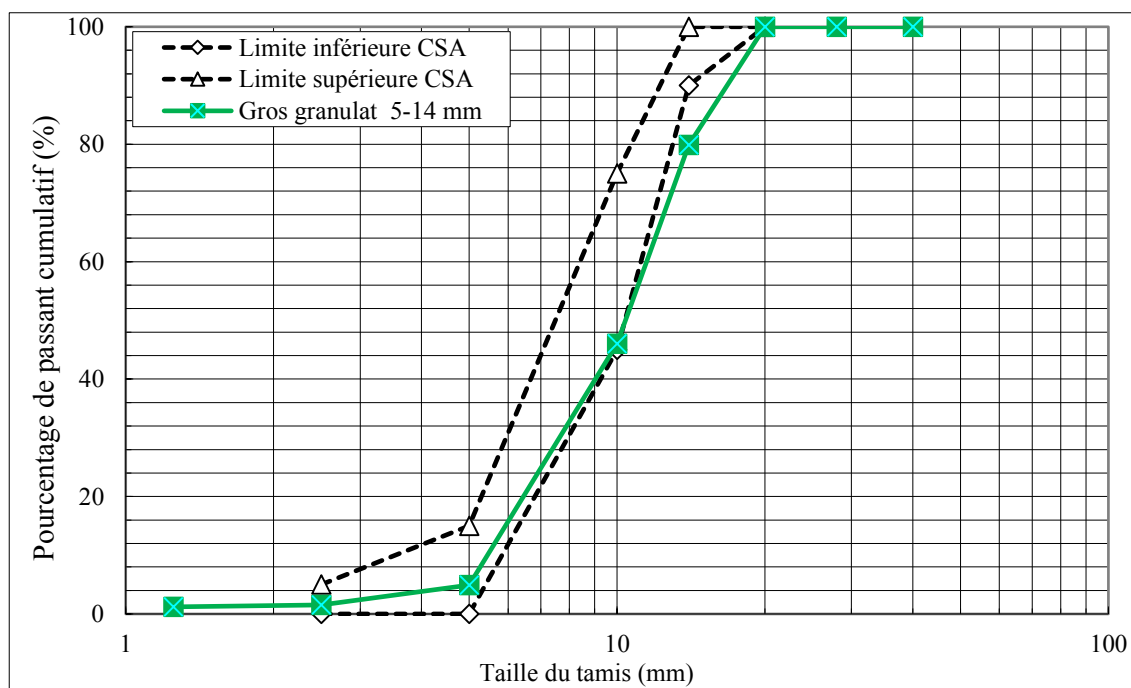
**Figure 27 :** Courbe granulométrique du sable naturel (0-5 mm)

3.2.2.2 Gros granulat naturel

La granulométrie des gros granulats naturels utilisés dans la fabrication des BAP et le fuseau normalisé selon la norme CSA sont présentés dans le tableau 14 et illustrés dans les figures 28 et 29.

Tableau 14 : Granulométrie des gros granulats naturels

Tamis (mm)	Gros granulats naturels		Fuseau normalisé CSA	
	Tamisas cumulés (%)		Min	Max
	GGN 5-10 mm	GGN 5-14 mm		
40	100	100	100	100
28	100	100	100	100
20	100	100	85	100
14	100	82,3	60	90
10	86,9	40,7	25	60
5	13,4	2,9	0	10
2,5	5,9	1,0	0	5
1,25	4,2	0,8	0	0
0.630	1,1	0,0	0	0
0.315	0,0	0,0	0	0
PLAT	0,0	0,0	/	/

**Figure 28 :** Courbe granulométrique du gros granulat 5-14 mm

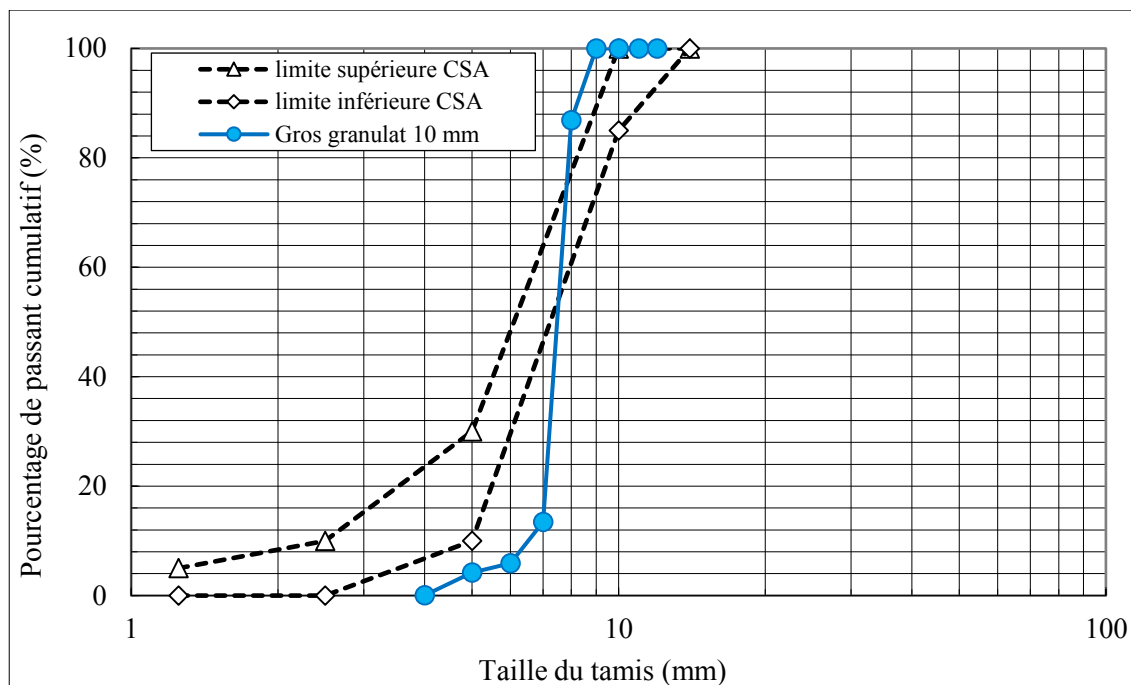


Figure 29 : Courbe granulométrique du gros granulat naturel de diamètre 10 mm

3.2.3 Granulats recyclés

Les granulats recyclés (GR) utilisés lors de cette étude sont des matériaux de classe MR-2 (calibre 31,5 mm) provenant de Recy-Béton Inc.

3.2.3.1 Identification de la classe MR-2

La norme NQ2560-600 (Norme relative à l'identification et à l'utilisation des matériaux recyclés MR) définit les GR de classe MR-2 contenant des résidus d'enrobé bitumineux (BB) et de béton de ciment selon les proportions indiquées dans le tableau 15 [Moniz *et al.*, 2013].

Tableau 15 : Composition des GR de classe MR-2 [NQ2560-600]

Catégorie /Constituants Masse	(Kg)	%
Béton	56,1	88
Résidus d'enrobés bitumineux	5,4	9
Granulats naturels	2,0	3
Total	63,5	100

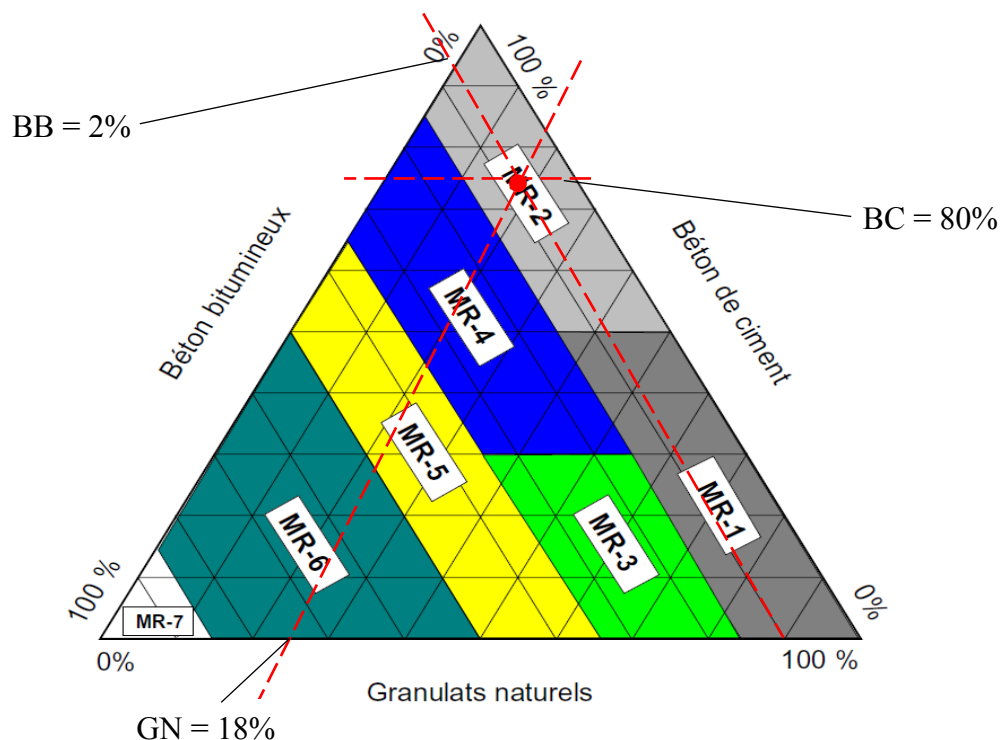


Figure 30 : Classification québécoise des MR (NQ 2560-600) [Moniz, 2012]

3.2.3.2 Tamisage et séparation les fractions de MR-2

Le tamisage de MR-2 a été effectué par un tamiseur mécanique pour séparer les deux fractions de granulats recyclés, la fraction grossière entre 5 à 20 mm et la fraction fine (i.e. le sable recyclé) de diamètre maximal de 5 mm. Ceci nous a permis de déterminer le pourcentage de chaque fraction ainsi que la détermination de l'analyse granulométrique du sable recyclé seul SMR-2 (0-5 mm), du gros granulat GMR (5-20 mm) et du MR-2 (0-20 mm).

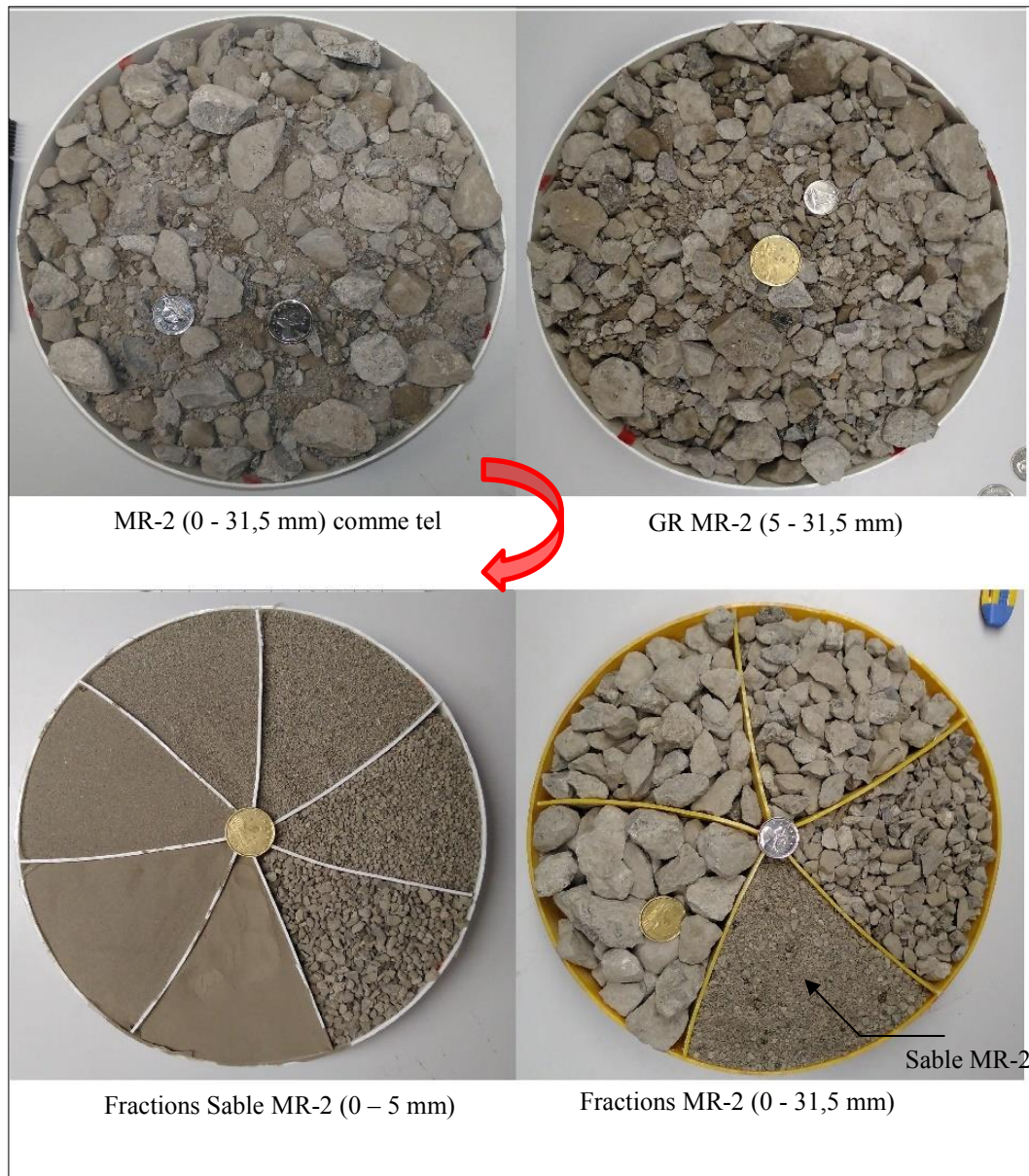


Figure 31 : Les GR de classe MR-2 avant tamisage et les fractions après tamisage



Figure 32 : Asphalté et granulat recyclé enrobé par l'asphalte

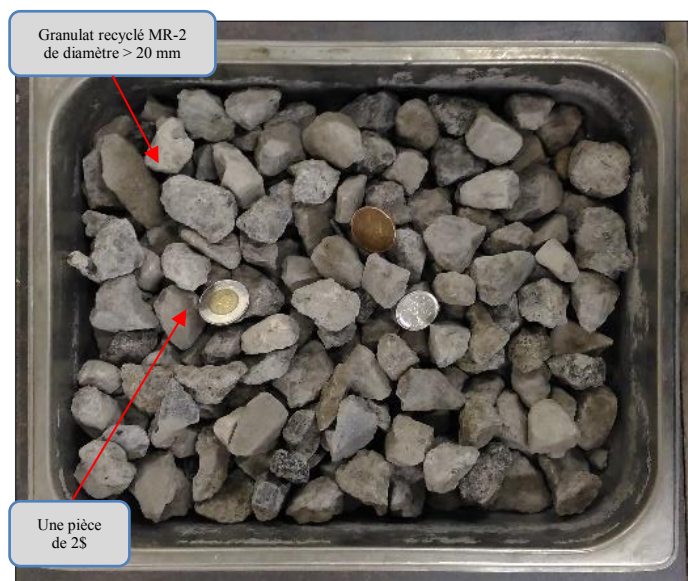


Figure 33 : Fraction de granulat recyclé de MR-2 supérieure à 20 mm

3.2.3.3 Sable recyclé

Le sable recyclé provenant du GR de type MR-2 est la fraction inférieure à 5 mm. Elle est récupérée lors du tamisage de MR-2, nommé SMR-2. La section 4.1.1.2 du chapitre (4) « présentation des résultats », montre les résultats de caractérisation obtenus sur le sable recyclé.

3.2.3.4 Gros granulats recyclés

Le gros granulat utilisé dans le cadre de cette étude est constitué de la fraction supérieure à 5 mm et inférieure à 20 mm du MR-2. Il est désigné par le GMR-2 (5-20 mm). Les résultats de

caractérisation de granulats recyclés sont présentés dans la section 4.1.1.2 de chapitre (4) « présentation des résultats ».

3.2.4 Adjuvants

Deux types de produits chimiques utilisés lors de la fabrication des bétons, un superplastifiant et un agent entraîneur d'air (AEA). Le superplastifiant utilisé dans le cadre de cette étude est un polycarboxylate produit par Sika Canada. Il a une teneur en extrait sec de 40%. Par ailleurs, l'agent entraîneur d'air utilisé lors de la production des bétons est un surfactant synthétique en solution aqueuse utilisé pour l'entraînement d'air dans le béton [Fiche technique Sika Air 260].

3.2.5 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est l'eau potable du laboratoire de génie civil ayant un pH égal à 7. L'eau utilisée est exempte de produits chimiques.

3.3 Procédures expérimentales sur les bétons autoplaçants

3.3.1 Formulations des BAP et calculs des formulations de BAP aux GR

Pour la formulation d'un béton autoplaçant, il n'existe pas de méthode universelle précise. L'approche de formulation des BAP dépend de leur application et des exigences spécifiques. En général, il s'agit d'assurer un BAP fluide et homogène sans ségrégation et sans ressuage. Selon les recommandations du comité de l'American Concrete Institute (ACI) sur l'emploi des bétons autoplaçants [ACI 237 R2007], on peut suivre les étapes suivantes

3.3.1.1 Teneurs en poudre suggérées

Le Tableau 16 résume les recommandations du comité ACI 237-R sur la teneur en liant dépendamment de l'étalement des bétons autoplaçants visés.

Tableau 16 : Gamme de teneur en liant en fonction de l'étalement (ACI 237)

	Béton autoplaçant		
Étalement	< 550 mm	550 - 600 mm	> 650 mm
Teneur en liant (L/m ³)	355 à 385	385 à 445	> 458

3.3.1.2 Paramètres de formulation et dosage des composants de BAP

Le Tableau 17 présente les teneurs et le pourcentage de constituants des BAP proportionnés avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,32 à 0,45.

Tableau 17 : Recommandations du comité de l'ACI sur l'emploi de béton autoplaçant

Volume absolu d'agrégats grossiers	28 à 32% > 12 mm, taille maximale nominale
Fraction de pâte (calculée en volume)	34 à 40% volume total du mélange
Fraction de mortier (calculée en volume)	68 à 72% volume total du mélange
Rapport Eau / ciment	0,32 à 0,45
Teneur en liant	385 à 475 kg/m ³

3.3.1.3 Procédure de formulation

Les BAP considérés dans cette étude sont proportionnés avec un rapport eau/liant (E/L) de 0,35, un volume de pâte de 35% et un volume de granulats égal à 65% (Tableau 17). La teneur en liant utilisée est de 420 kg/m³. La méthode de volume absolu est utilisée pour déterminer les quantités des matériaux nécessaires pour la formulation des BAP. Le squelette granulaire utilisé est constitué de 50% de gros granulat naturel (GGN) et de 50% de granulat fin naturel (GFN). La teneur des gros granulats et du sable est déterminée en utilisant la courbe Fuller Thompson. Cette combinaison a permis l'obtention d'une courbe optimale proche de la courbe visée.

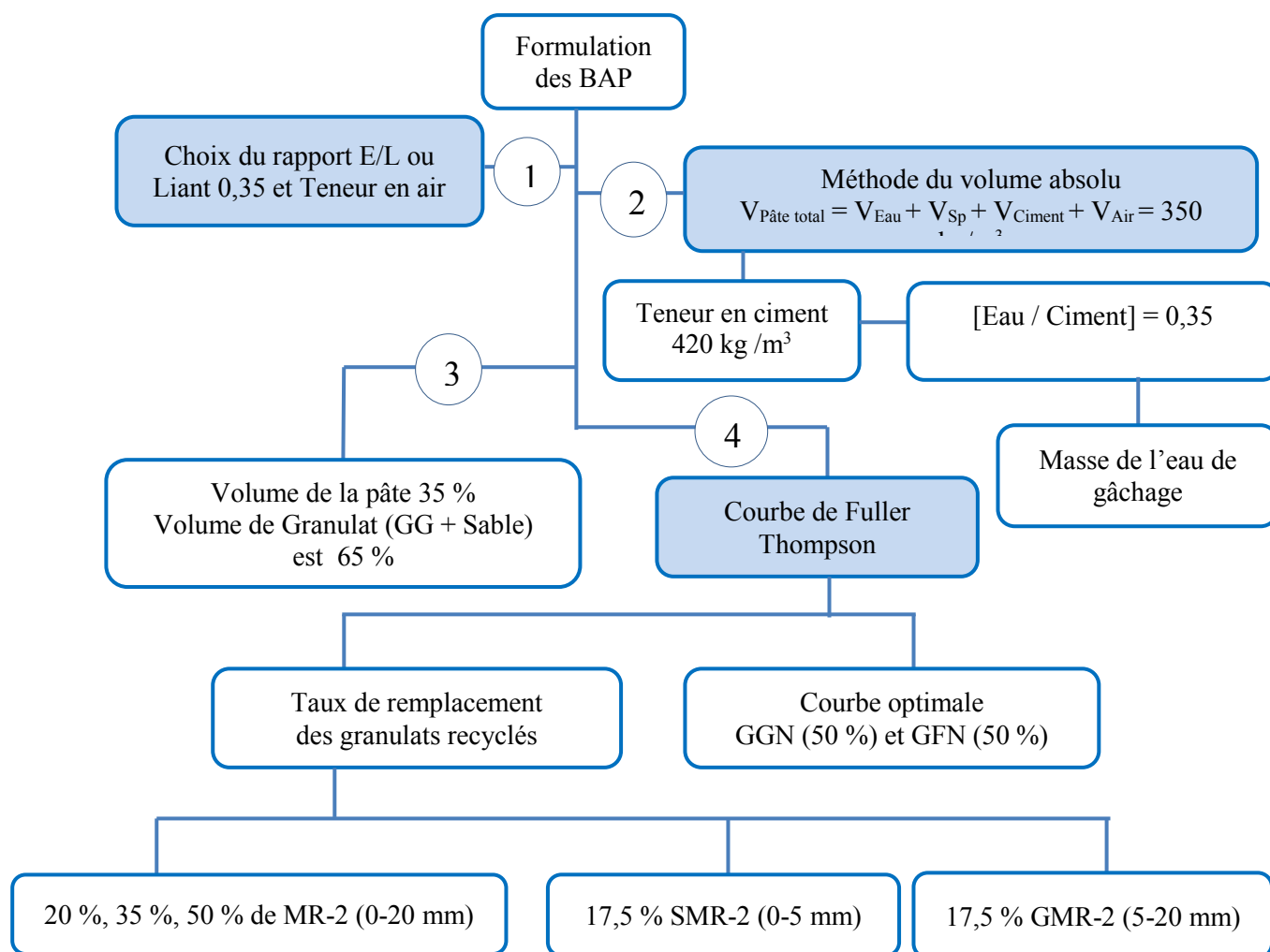


Figure 34 : Formulations des BAP étudiés

3.3.2 Optimisation granulaire de différents taux de remplacement

L'optimisation granulaire est effectuée en utilisant la courbe Fuller Thompson. En effet, les teneurs des matériaux choisis sont dosés de sorte que la courbe obtenue soit similaire à la courbe visée, l'écart doit être minimisé (Figures 35 et 36).

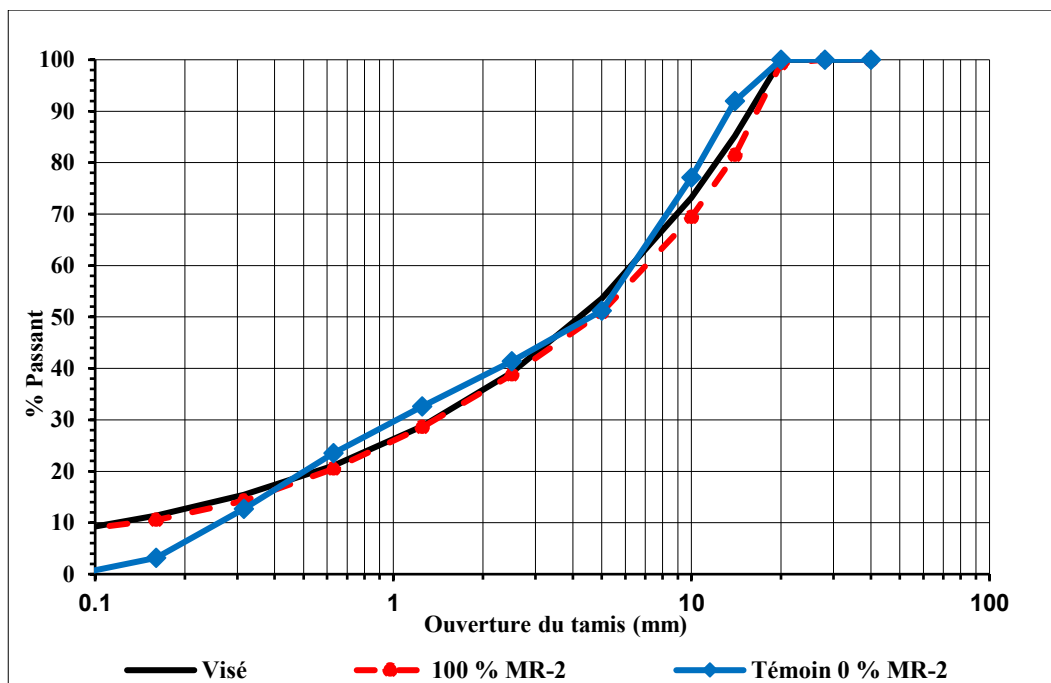


Figure 35 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, Mélange Témoin 100% MR-2

Optimisation granulaire complète

Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton
Par Richard Gagné - CRIB Sherbrooke
et Pierre Lemieux - Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke

Diamètre nominal maximal du granulat : 20 mm
Type de sable : **Mélangé St-Dominique** 2,7
Type de pierre : **St-Dominique**
Type de ciment : **Type GU et Gub**
Matériau fin #1 : **Non**
Matériau fin #2 : **Non**

50 / 50 MR2

Exposant de la fonction de distribution : **0,45**

Tamis (mm)	Tamisats des classes granulaires (%)					Matériaux fins (<160 µm)			Combiné total	Visé (%)	Écart (%)	Écart au carré
	GN5/14	MR-2 20mm	GN5/10	Sb Demix	S-MR-2	Ciment	Cendre	FS				
40	100	100,0	100,0	100,0	100,0				100	100	0	0
28	100	100,0	100,0	100,0	100,0				100	100	0	0
20	100	98,5	100,0	100,0	100,0				99	100	-1	1
14	82,3	62,9	100,0	100,0	100,0				81	85	-4	14
10	40,7	38,7	86,9	100,0	100,0				69	73	-4	15
5	2,9	1,9	13,4	96,7	99,9				51	54	-3	7
2,5	1,0	0,9	5,9	84,2	76,6				39	39	0	0
1,25	0,8	0,8	4,2	70,7	56,3				29	29	0	0
0,630	0,0	0,2	1,1	54,9	40,8				20	21	-1	0
0,315			0,1	30,4	28,5				14	15	-1	1
0,160			0,0	7,5	21,1				11	11	-1	1
0,087			0,0	0,2	17,2				9	9	0	0
0,054				0,0	17,2				9	7		
0,028												
0,022												
0,010												
0,005												
0,002												
Densité	2,70	2,49	2,75	2,74	2,41	3,14	2,40	2,20				
	0,0	50,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	100			39
	0,0	124,5	0,0	0,0	120,5	0,0	0,0	0,0				
	Granulats (%): 100					Fines (%): 0						
	0	50	0	0	50	0	0	0				

Figure 36 : Tableau d'optimisation granulaire à l'aide du « Excel » Mélange Témoin 100% GN, (20%, 35%, 50%) MR-2, 17,5% GMR-2 et 17,5% SMR-2

Les formulations théoriques des différents mélanges, témoin proportionné avec 0% GN et béton contenant 35% des granulats recyclés sont présentés dans le tableau 18. Les formulations sont

préparées en utilisant un malaxeur à palettes verticales et ayant une capacité de 120 litres. Par ailleurs, le volume de béton préparé est de 100 litres.

Tableau 18 : Proportions des bétons témoins et aux granulats recyclés

Béton pour 110 L	E/C = 0,35			
	100% GN		35% MR-2 et 75% GN	
	Masse (kg)	Volume (L)	Masse (kg)	Volume (L)
Liant	47,1	15,3	47,1	15,3
Eau	16,3	16,3	16,3	16,3
GGN 5-10	19,7	7,2	9,7	3,5
GGN5-14	77,2	28,6	56,0	20,8
GF 0-5	98,0	35,8	67,8	24,7
SP	0,2	0,3	0,3	0,3
AEA	0,1	6,6	0,08	6,6
GMR-2 (5-20)	0,0	0	31,2	12,5
SMR-2 (0-5)	0,0	0	30,2	12,5
Somme	258,5	110	258,7	112,5
MV en (Kg/M ³)	2351		2298	

La quantité massique des matériaux utilisés dans la formulation est calculée à partir des volumes obtenus et des densités des matériaux utilisés. Les valeurs des densités des matériaux sont présentées dans le tableau 19.

Tableau 19 : Densités à l'état SSS et absorptions des matériaux utilisés

Matériaux	GMR-2	SMR-2	GN 5-10	GN 5-14	SN	AEA	Ciment TerC ³	SP
D _{SSS}	2,49	2,41	2,75	2,70	2,74	1,008	3,08	1,08
Abs	4,58	4,85	0	0	0,93	-	-	-

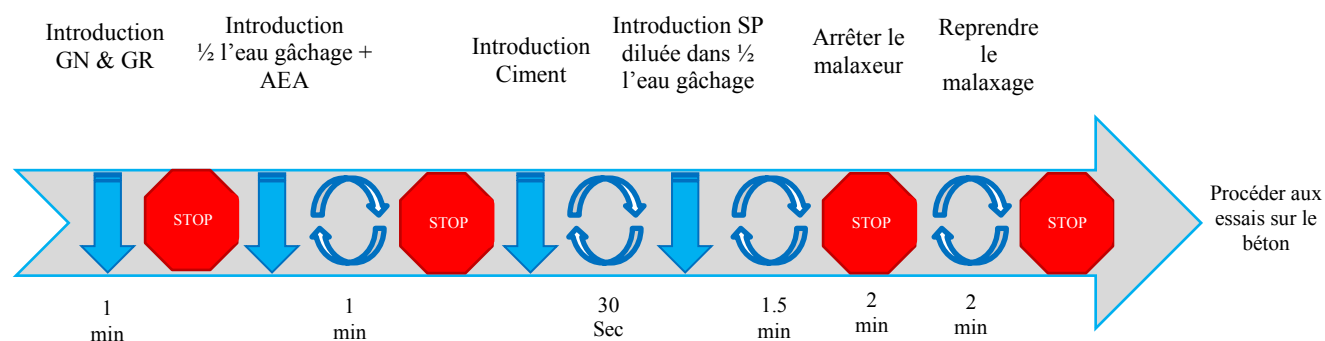
3.3.3 Séquence de malaxage

La séquence de malaxage a beaucoup d'influence sur les caractéristiques que le béton aux GR développera à l'état frais et durci. Cela s'explique par l'absorption que le granulat recyclé peut présenter. Pour réduire les effets négatifs sur les propriétés finales du béton. La méthode de malaxage utilisée lors la production des BAP au GR est la séquence de malaxage en deux étapes. Tous les BAP sont malaxés de la même manière. La séquence de malaxage est résumée dans le tableau 20.

Tableau 20 : Séquence de malaxage en deux étapes

Opérations / Étapes	t (min)
Ajouter le sable et malaxer pendant 30 secondes	Début
Procéder à la correction de la quantité d'eau de malaxage et du sable en fonction de son humidité	0,5
Ajouter les granulats au malaxeur et malaxer pendant 1 minute. S'assurer de l'homogénéité de l'ensemble	1,0
Ajouter l'AEA dilué dans 50% d'eau de gâchage et malaxer durant 1 minute	1,0
Ajouter le liant et malaxer durant 2 minutes	2,0
Après les premières 30 secondes de malaxage, ajouter le SP dilué dans les 50% d'eau de gâchage restante	-
Arrêter le malaxeur durant 2 minutes et laisser reposer	2,0
Reprendre le malaxage pendant 2 minutes	2,0
Arrêter le malaxeur et procéder aux essais sur le béton frais (Étalement, teneur en air, température, J-Ring, etc.)	-
Si les essais sont conformes = (*), sinon = (**)	-
(*) Malaxer 0,5 minute et échantillonner	-
(**) Procéder à l'ajustement du béton par l'ajout de SP et/ou AEA selon le cas et reprendre les essais. Une fois ces derniers sont jugés conformes, nous procédons à la confection des éprouvettes	Fin

La durée totale de malaxage est de 8 minutes. La Figure 37 présente la séquence de malaxage, en deux étapes, utilisée pour la confection des bétons aux GR.

**Figure 37** : Séquences de malaxage, en deux étapes, utilisée pour la production des bétons

3.3.4 Préparation des granulats recyclés

La préparation des granulats recyclés est effectuée en plusieurs étapes. La première étape est la caractérisation, notamment la détermination de l'absorption et la cinétique d'absorption. Par ailleurs, la seconde étape est le tamisage et la séparation des deux fractions de MR-2 (sable et gros granulats) et la saturation pendant 24 heures à l'eau des deux fractions de granulats. Avant le

bétonnage, on a fait la correction de la teneur en eau des granulats recyclés (les matériaux granulaires sont utilisés dans un état (SSS). La Figure 38 présente une photo, prise lors de la production de béton, montrant l'état de saturation des granulats recyclés avant la confection du béton.



Figure 38 : Granulat MR-2 à l'état SSH (saturé surface humide)

La formulation de béton est basée sur la densité des matériaux à l'état SSS. Par ailleurs, les granulats recyclés utilisés sont saturés, les pores remplis d'eau et leur surface humide, Ce qui correspond à l'état saturée surface humide (SSH). L'utilisation des MR-2 à l'état SSH augmente le rapport E/C. Ainsi, pour maintenir un rapport E/C fixe, une correction de la teneur en eau des granulats recyclés est réalisée.

La Figure 39 montre les états possibles de granulats poreux, très secs, naturellement secs, saturés surface sèche (SSS) et saturés surface humide (SSH).

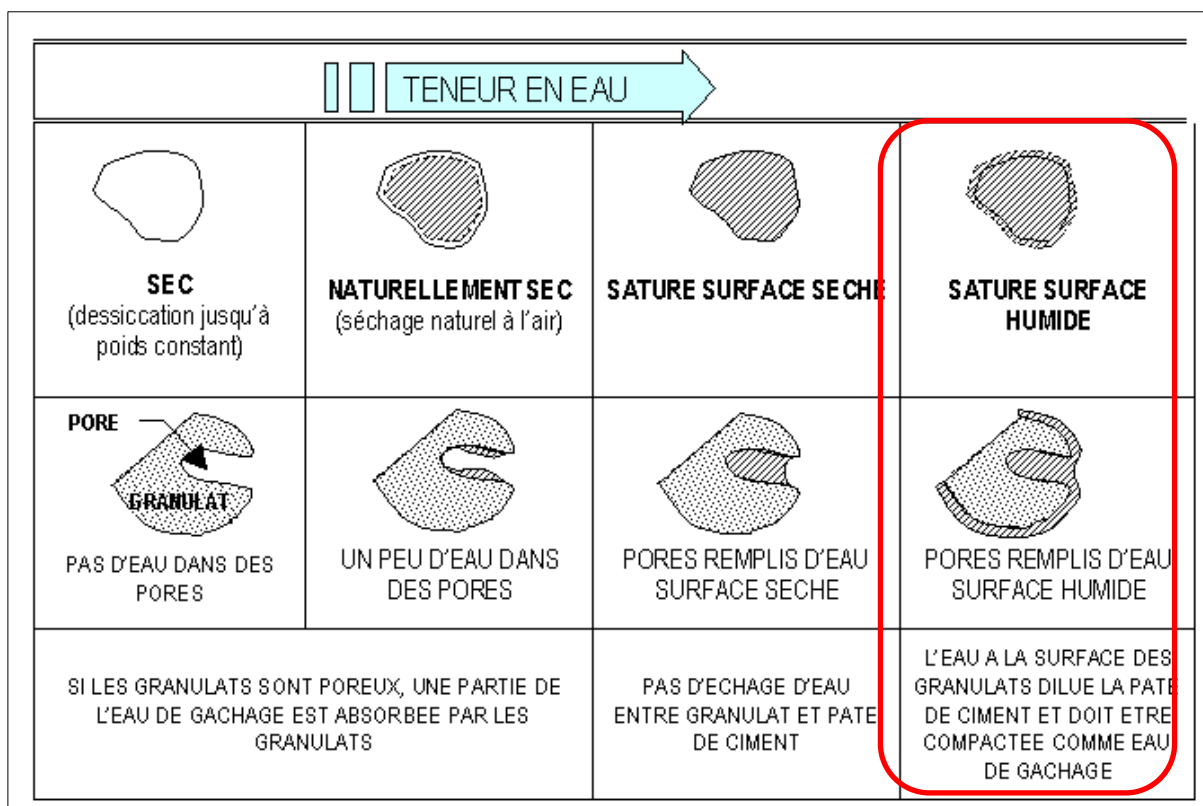


Figure 39 : Les états possibles des granulats poreux [Aadil-Laabous, 2014]

3.4 Description des procédures d'essais

Dans cette partie, les procédures d'essais et leurs conformités avec les normes en vigueur sont présentées. Il s'agit des essais de caractérisation des matériaux, des propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi que de la durabilité.

3.4.1 Analyse granulométrique, densité et absorption

La première étape principale effectuée est la caractérisation des matériaux utilisés. Pour assurer l'homogénéité des granulats recyclés, on a utilisé la méthode de quartage avant le tamisage. La seconde étape est l'analyse granulométrique des granulats fins et des gros granulats réalisés suivant la norme CSA A23.2-2A. Selon la norme CSA A23.1-04, on peut déterminer si l'analyse granulométrique des granulats répond aux exigences et les limites du fuseau normalisé.

La détermination de l'absorption des granulats fins et des gros granulats est réalisée selon les normes CSA A23.2-6A et ASTM C128-15.

3.4.2 Caractérisation des propriétés rhéologiques et mécaniques

La seconde étape est la réalisation des essais sur béton frais et durci, notamment la maniabilité, les résistances mécaniques et la durabilité.

3.4.2.1 Essais réalisés sur BAP frais

Le béton autoplaçant est caractérisé par sa grande déformabilité à l'état frais. Les propriétés à l'état frais, incluant la masse volumique, la teneur en air, l'étalement, le T_{50} et le J-Ring sont réalisés selon les recommandations du comité ACI 237 R et les normes des ASTM citées dans le tableau 11.

1) Teneur en air :

La teneur en air des BAP frais est déterminée à l'aide d'un air mètre pour le béton en utilisant la méthode pressiométrique et la valeur affichée sur l'écran est le pourcentage d'air dans le béton.

2) Ouvrabilité

1. Étalement

L'essai d'étalement est réalisé à l'aide d'un cône d'Abrams et d'une planche sur laquelle on a tracé un cercle de diamètre 500 mm. La mesure de l'étalement des BAP est effectuée conformément à la norme ASTM C1611/C1611M.

2. J-Ring :

Il est conforme à la norme ASTM C 1621 : La méthode d'essai standard de J-Ring pour déterminer la capacité de passage et de l'écoulement des BAP au travers de zones confinées. Le test peut être utilisé en laboratoire pour comparer la capacité de passage de différents mélanges ou sur le terrain. L'ensemble comprend un anneau en J robuste en acier et une grande plaque de base en plastique rigide sur laquelle on effectue l'essai, un cône d'Abrams, une tige et une règle. La bague en J, la plaque de base et le cône d'Abrams sont conformes aux normes ASTM C-1611 et C-1612 / C 1621M-06. À la fin du test J-Ring, on mesure le diamètre de l'étalement et les hauteurs intérieure et extérieure.

3.4.2.2 Essais réalisés sur le BAP durci

Après la production des bétons autoplaçants, de référence et à base des granulats recyclés, la masse volumique, la teneur en air, l'étalement, J-Ring ont été mesurés afin de déterminer les propriétés des BAP à l'état frais. De plus, des cylindres et des poutres ont été confectionnés pour évaluer les propriétés mécaniques et la durabilité des BAP. Le démoulage des cylindres et des éprouvettes se fait après 24 heures de coulage. Par la suite, ces derniers sont entreposés dans une chambre humide, pour assurer une cure externe conformément à la norme ASTM C192.

1) Résistance à la compression

Pour déterminer la résistance à la compression, on a utilisé des cylindres de 100 x 200 mm. Avant de mesurer la résistance à la compression, le cylindre doit être surfacé sur les deux côtés pour favoriser une distribution uniforme des contraintes sur toute la surface des cylindres.

La résistance à la compression est déterminée, en appliquant une charge sur le cylindre de 100 x 200 mm jusqu'à la rupture, conformément à la norme ASTM C39. La valeur de la résistance à la compression à chaque âge de béton est la moyenne de trois cylindres. Ces essais sont réalisés à un taux de chargement de 120 KN/mm. On détermine la résistance à la compression à 7, 14, 28, 56 et 91 jours. La presse nous donne des charges de rupture en KN. Ces charges sont converties en résistance à la compression f_c' (MPa) qui est calculée par la formule suivante :

$$f_c' = F / S \quad \text{Équation (4)}$$

Avec :

F : Charge enregistrée au moment de la rupture du cylindre

S : Section du cylindre.

2) Résistance à la traction par fendage :

La résistance à la traction des bétons est déterminée sur des cylindres de dimension 100 x 200 mm, conformément à la norme ASTM C496 (Tableau 11). La valeur de la résistance à la traction à chaque âge de béton est la moyenne de deux cylindres. Le taux de chargement appliqué sur les cylindres est 1200 lb / 10 secondes. La résistance à la traction est déterminée à 7, 14, 28, 56 et 91 jours.

3) Résistance en flexion

La résistance en flexion est déterminée par un essai de traction par flexion. La poutre à ça base est installée sur deux appuis espacés d'une distance de (3 a), et de deux appuis supérieurs espacés d'une distance (a). Au milieu de la poutre, une charge est appliquée sur l'échantillon jusqu'à la rupture. La résistance en flexion est déterminée conformément à la norme ASTM C78 sur une poutre de dimension 150 x 150 x 400 mm. Le taux de chargement appliqué pour l'essai de flexion est 250 lb/10 secondes. Le résultat de la résistance à la flexion à chaque âge de béton est la moyenne de deux cylindres. La valeur trouvée doit être de 10 à 20 % de la résistance à la compression, dépendamment des paramètres de formulation, tels que la taille des granulats, le volume de granulats, le rapport E/C et la teneur en ciment.

4) Module d'élasticité E

Le module d'élasticité E est le rapport entre la contrainte et la déformation du béton soumis sous un cycle de chargement. Traduit la rigidité du béton, L'essai est réalisé conformément à la norme ASTM C469/C469M sur un cylindre de 100 x 200 mm. Le module peut être affecté par plusieurs paramètres dont la composition ou la propriété du béton, le rapport E/C, la teneur en ciment, le volume de granulats, la taille de granulats, le type de granulats (granulat léger, recyclé, réactif), la résistance à la compression. Le module est déterminé en appliquant une charge de 40 % de la résistance à la compression pour le même mélange.

5) Fluage en compression :

Les essais de fluage en compression du béton sont déterminés selon la norme ASTM C512/C512M. Trois cylindres de 150 x 300 mm sont placés dans un bâti, sous une charge de 40% de la résistance à la compression. Six plots sont installés sur les cylindres permettant de mesurer la déformation relative en utilisant un extensomètre. Trois lectures sont effectuées pour chaque cylindre. La valeur finale est la moyenne des trois cylindres. Le 4^e cylindre détermine le retrait total, dans une chambre où l'humidité et la température sont contrôlées. Il s'agit de caractériser le fluage en compression de deux bétons autoplaçants (100% GN et 35% MR-2 saturés d'eau) selon la norme ASTM C512 pour une échéance de chargement de 91 jours. Conformément à la norme ASTM C512, le mûrissement humide a été maintenu jusqu'à 28 jours. À 28 jours, les 8 cylindres ont été mis en séchage dans la salle de fluage à 50% d'humidité relative et à une température de 22°C.

Le calcul du fluage à l'aide de la formule suivante (ASTM C512) :

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{E}\right) + F(K)\ln(t + 1) \quad \text{Équation (5)}$$

Avec :

ε : Déformation moyenne des 3 cylindres par unité de contrainte, MPa⁻¹

E : Module élastique instantané, défini comme l'ordonnée à l'origine de l'interpolation linéaire, MPa

$F(K)$: Taux de fluage, défini comme la pente de l'interpolation linéaire

t : Durée de chargement, jour

La Figure 40 présente le montage des trois cylindres dans un bâti au laboratoire de génie civil de l'Université de Sherbrooke.



Figure 40 : Montage d'un essai de fluage en compression

6) Qualité de l'adhérence d'un béton réparé :

L'essai pour déterminer la qualité de l'adhérence d'un béton réparé se fait sur un demi-cylindre de 100 x 200 mm. Cet essai est appliqué sur deux types de bétons autoplaçants, les BAP avec 100% GN et des BAP contenant 35% MR-2, afin de déterminer la résistance à la compression et à la traction de l'élément réparé. La Figure 41 présente un demi-cylindre placé dans un moule de 100 x 200 mm afin de couler le nouveau béton de réparation.

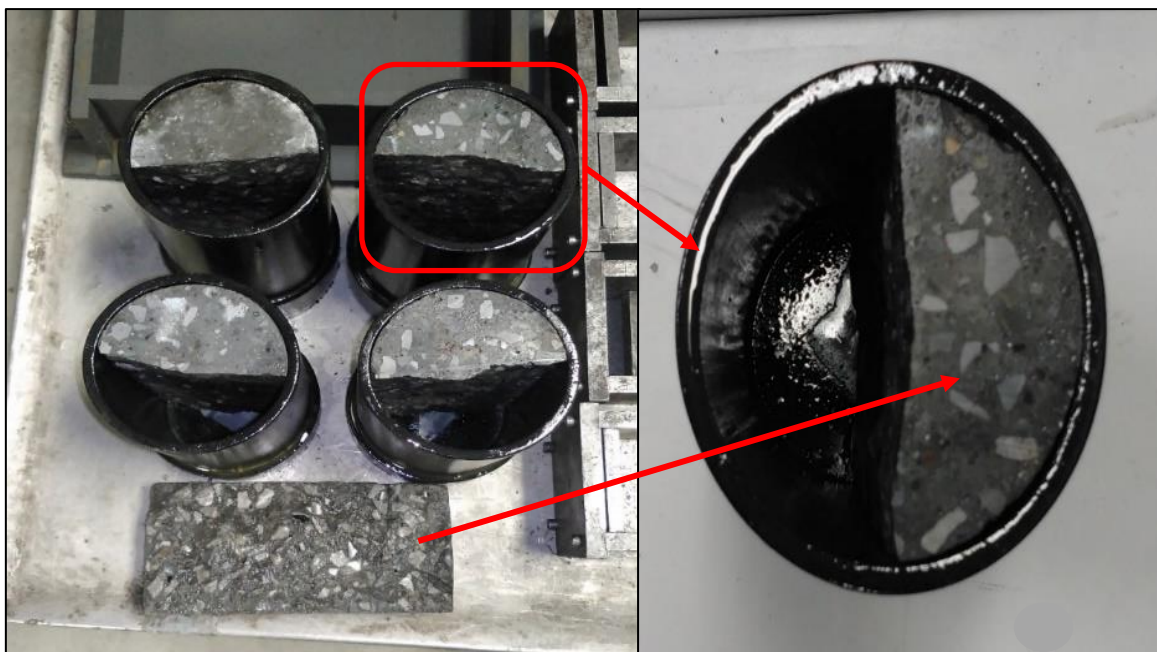


Figure 41 : Demi-cylindre dans un moule de 100 x 200 mm

Les Figures 41 et 42 présentent la méthode utilisée pour déterminer la qualité d'adhérence entre un béton endommagé et un nouveau béton. Bien que les résultats obtenus ne fournissent pas la résistance à la traction absolue, l'essai a permis de déterminer la qualité d'adhérence entre les deux bétons. La méthode est simple à réaliser comme présentée à la figure 42.

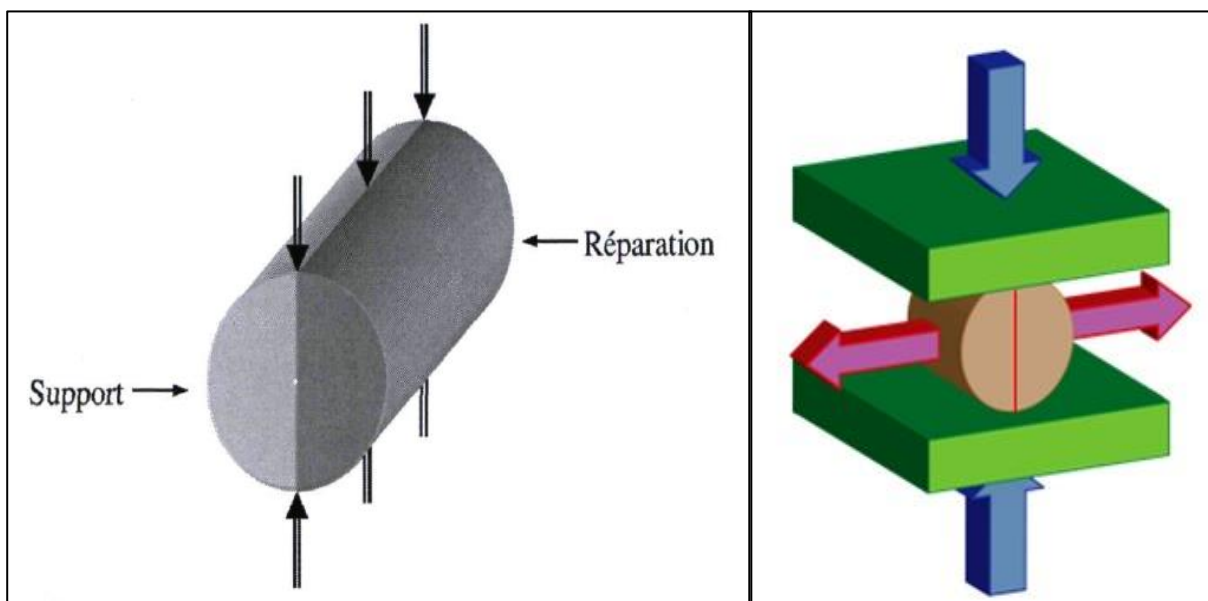


Figure 42 : Essais de traction par fendage sur un cylindre bicouches moulées / principe

3.4.3 Essais de la durabilité des BAP

3.4.3.1 Résistivité électrique

Les essais de la résistivité électrique sur le béton durci donnent une information sur sa perméabilité. L'essai est réalisé sur les mêmes échantillons de bétons qui sont présentement utilisés pour le test de la résistance à la compression 100 x 200 mm. La procédure consiste à appliquer un courant électrique sur l'éprouvette de béton et à mesurer la tension entre deux extrémités (Figure 43). La valeur (Z) affichée sur l'écran de l'appareil est utilisée pour calculer la résistivité électrique selon la formule suivante :

$$\rho = \frac{A}{L} \times Z \quad [\Omega \cdot \text{cm}^2] \quad \text{Équation (6)}$$

ρ : résistivité électrique [$\Omega \cdot \text{cm}^2$].

A : surface de l'éprouvette [cm^2].

L : longueur de l'éprouvette [cm].

Z : impédance mesurée par le dispositif [Ω].

La résistivité électrique dans notre étude est réalisée sur tous les mélanges, à des âges 7, 14, 28, 56 et 91 jours. Les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs mentionnées dans le (Tableau 22).



Figure 43 : PGI Rcon mètre pour la résistivité électrique du béton

3.4.3.2 Pénétration aux ions de chlorure

Les essais des perméabilités aux ions de chlorure de tous les mélanges réalisés sont effectués suivant la norme ASTM C1202-12. L'essai de la perméabilité des ions de chlorure dans le béton est considéré comme un bon indicateur de la qualité et de la durabilité du béton. Le principe de l'essai consiste à mesurer la charge en coulombs traversée dans un cylindre de 50 mm d'épaisseur et de 100 mm de diamètre. Pendant une durée de six heures. L'échantillon est placé entre deux solutions, l'une acide (NaCl) et l'autre basique (NaOH) à travers lesquelles on passe un courant de 60 Volts. Le résultat est la moyenne de deux échantillons, le premier résultat est la partie supérieure du cylindre de 100 x 200 mm, le deuxième est la partie inférieure du même cylindre. Avant d'exécuter l'essai, les échantillons sont mûris dans une chambre humide à température et humidité contrôlées. Le Tableau 21 présente la relation entre la résistivité électrique et la perméabilité des ions aux chlorures des bétons selon leur classe.

Tableau 21 : Classes de pénétration des ions aux chlorures selon les valeurs de perméabilité aux ions chlorures et de résistivité électrique.

Caractéristiques pour :	La pénétration au chlore	Pénétration des ions chlore et résistivité électrique	
		Perméabilité à 56 jours ASTM C1202 (coulombs)	Résistivité à 28 jours (KΩ.cm)
Béton ayant un rapport de E/C (>0,60)	Haut	> 4000	< 5
Béton ayant un rapport E/C entre 0,40 et 0,50	Modéré	2000 - 4000	5 - 10
Béton ayant un faible rapport E/C (< 0,40)	Faible	1000 - 2000	10 - 20
Béton modifié au latex ou béton interne scellé	Très Faible	100 – 1000	20 - 200
Béton au polymère	Négligeable	< 100	> 200

3.4.3.3 Résistance aux cycles de gel-dégel

Les essais de la résistance aux cycles de gel-dégel sur le béton durci sont effectués conformément à la norme ASTM C 666M-03. L'essai est réalisé sur des poutres de 75 x 75 x 355 mm. Deux plots sont installés sur les deux côtés sur lesquels on mesure la déformation. Des échantillons sont mûris à 14 jours dans une chambre humide à température et humidité contrôlée et sont, par la suite, transportés dans un réfrigérateur à basse température. Le cycle de gel-dégel se situe entre (-18 °C) à (+4 °C). L'essai s'arrête à 300 cycles. Pour chaque 36 cycles de gel-dégel, on mesure le

changement de la longueur de la poutre avec un extensomètre et le module dynamique. Après 300 cycles de gel/dégel, si le facteur de durabilité dépasse les 80%, le béton est considéré comme résistant au gel/dégel.

3.4.3.4 Résistance à l'écaillage

Les essais de la résistance à l'écaillage sont déterminés conformément à la norme ASTM C672M-12. L'essai est effectué sur des échantillons de 255 x 280 x 75 mm après une cure de 14 jours à l'air. La procédure vise la résistance de la surface de béton. Il s'agit d'évaluer la dégradation de la surface d'un béton exposé à un milieu agressif. L'essai consiste à simuler l'effet des sels fondants utilisés durant les périodes hivernales pour le déglacage des dalles horizontales saturées d'une solution saline (4% de NaCl).

3.4.3.5 Retrait de séchage

Le retrait de séchage du béton est réalisé conformément à la norme ASTM C157/C157M. Des poutres de 75 x 75 x 285 mm sont utilisées avec deux plots installés au milieu de la face transversale de la poutre. Après 28 jours de la cure dans une chambre humide à 100% d'humidité et à 20,5°C de température, les échantillons sont placés dans une autre chambre à humidité relative de $50 \pm 4\%$. Par la suite, on mesure la variation d'allongement en utilisant un extensomètre, à 4, 7, 14, 28, 42 et 56 jours après un murissement de 28 jours.

3.4.3.6 Retrait endogène

Le retrait endogène est déterminé suivant deux méthodes : la première méthode utilise le même principe que l'essai de retrait de séchage, mais la poutre doit être emballée avec du papier d'aluminium autocollant (aucun contact entre le béton et l'atmosphère). Les échantillons sont stockés à l'air sur des conditions contrôlées (humidité relative de $50 \pm 4\%$ et température ambiante). La variation d'allongement est mesurée à l'aide d'un extensomètre et des plots installés à l'extrémité de l'échantillon (Figure 44). La variation d'allongement L est mesurée en (μm) et ΔL est la différence entre L à un temps égal à T_n et L_0 à un temps égal à T_0 . Le retrait endogène avec cette méthode est déterminé selon la formule suivante :

$$\text{Retrait endogène} = \frac{\Delta L}{L_0} [\mu\text{m}/\text{m}] \quad \text{Équation (7)}$$

Les résultats du retrait endogène sont représentés sous forme graphique en fonction de l'âge en jours. Le pourcentage de retrait de séchage est déterminé selon la formule suivante :

$$\text{pourcentage (\%)} = \frac{L_{\text{témoin}} - L_{\text{mélange}}}{L_{\text{témoin}}} \times 100 \quad [\%] \quad \text{Équation (8)}$$

La méthode est déjà utilisée dans les travaux de (Tanguy, 2010, université de liège Belgique, Interactions avec l'environnement de géopolymères à base de laitier). La Figure 44 présente la méthode utilisée pour déterminer le retrait endogène.



Figure 44 : Poutre sous un film d'aluminium et la méthode de mesure du retrait endogène avec les plots

La deuxième méthode utilise une corde vibrante. La poutre utilisée est de dimensions 100x100x400 mm. L'installation de la corde se fait avant le bétonnage (Figure 45). L'échantillon est démoulé après 24 heures et emballé dans un film d'aluminium autocollant (Figure 46), pour éviter l'échange entre le béton et l'atmosphère. La fréquence de l'enregistrement des données est de 1 lecture / 30 minutes) pendant la première semaine. Par la suite on change la fréquence, de 6 à 24 heures pour chaque lecture jusqu'à la fin l'essai qui dure de 28 jours. L'essai est réalisé sur un seul mélange, soit celui de 35% MR-2, on veut comparer les résultats obtenus par la méthode de corde vibrante avec la méthode du film d'aluminium.

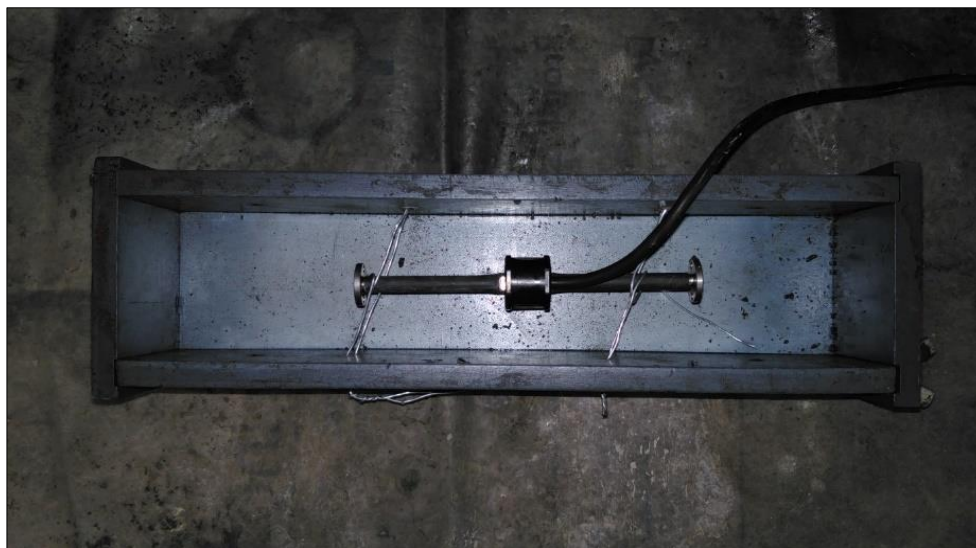


Figure 45 : Corde vibrante installée dans une poutre de 100x100x400 mm

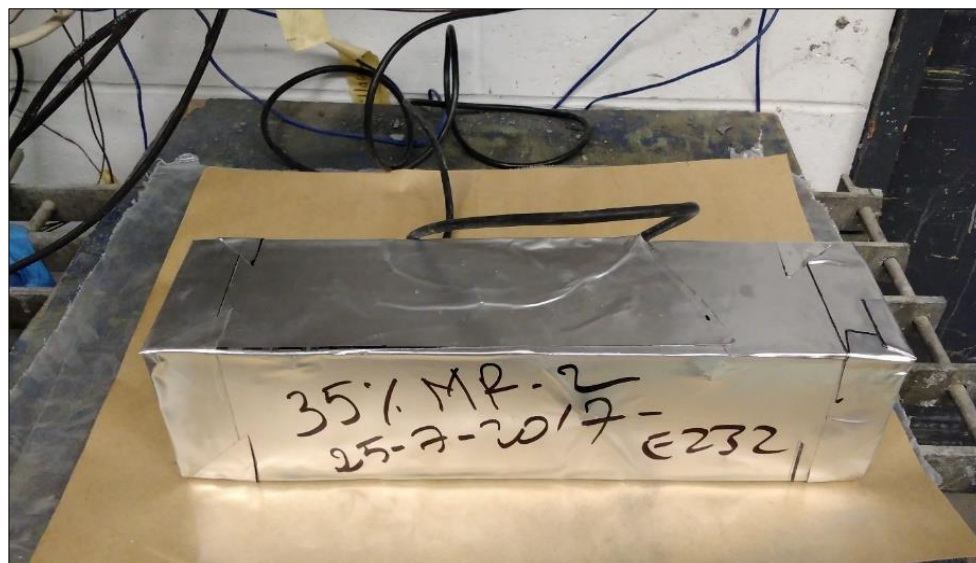


Figure 46 : Poutre de béton emballée dans un film d'aluminium autocollant

3.4.3.7 Retrait total

La détermination de retrait total à un âge donné est la somme des retraits de séchage et endogène, au même âge. Les mélanges étudiés sont, les BAP témoins, les BAP (35% MR-2, 17.5% GMR-2 et 17.5% SMR-2) saturés d'eau et les BAP 35 % MR-2 non saturés.

3.4.3.8 L'effet de murissement interne sur les propriétés de béton durci à l'air

Les essais consistent à produire deux types de béton à faible rapport E/C. Le premier à base de granulats recyclés saturés d'eau et le deuxième à base de granulats recyclés non saturés. Par la

suite, la résistance à la compression et la traction après 7, 28 et 56 jours de mûrissement à l'air (température de 21°C et humidité relative de $50 \pm 4\%$) sont mesurées.



Figure 47 : Cylindres de 100 x 200 mm mûris à l'air de laboratoire température de 21°C et humidité relative de $50 \pm 4\%$)

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

4.1 Phase I – Essais sur granulats

La première phase de cette étude a pour but de déterminer les propriétés des granulats recyclés de classe MR-2 et des granulats naturels. Les essais effectués dans le cadre de cette phase sont : la densité, l'absorption, la cinétique d'absorption et l'analyse granulométrique. L'identification du granulat recyclé du béton selon leur source et le diamètre maximal de la partie grossière est réalisée.

4.1.1 Caractérisation des matériaux utilisés

4.1.1.1 Échantillonnage et séparation des différentes fractions

L'échantillonnage a été effectué suivant la méthode de quartage pour assurer l'homogénéité. La Figure 48 montre la méthode utilisée de quartage.



Figure 48 : Échantillonnage de MR-2 par la méthode de quartage

4.1.1.2 Les granulats recyclés

Le granulat recyclé utilisé est conditionné pour éliminer la fraction supérieure à 20 mm. Par la suite, le granulat est séparé en deux fractions : le sable recyclé SR-2 de diamètre entre 0 et 5 mm et les gros granulats GR-20 mm de diamètre compris entre 5 et 20 mm.

À la fin de la préparation de l'échantillon final, un tamisage du matériau échantillonné est réalisé. Cette opération de séparation des fractions du matériau recyclé a pour but de déterminer le pourcentage de différentes fractions. La Figure 49 présente les fractions de MR-2 tamisées.

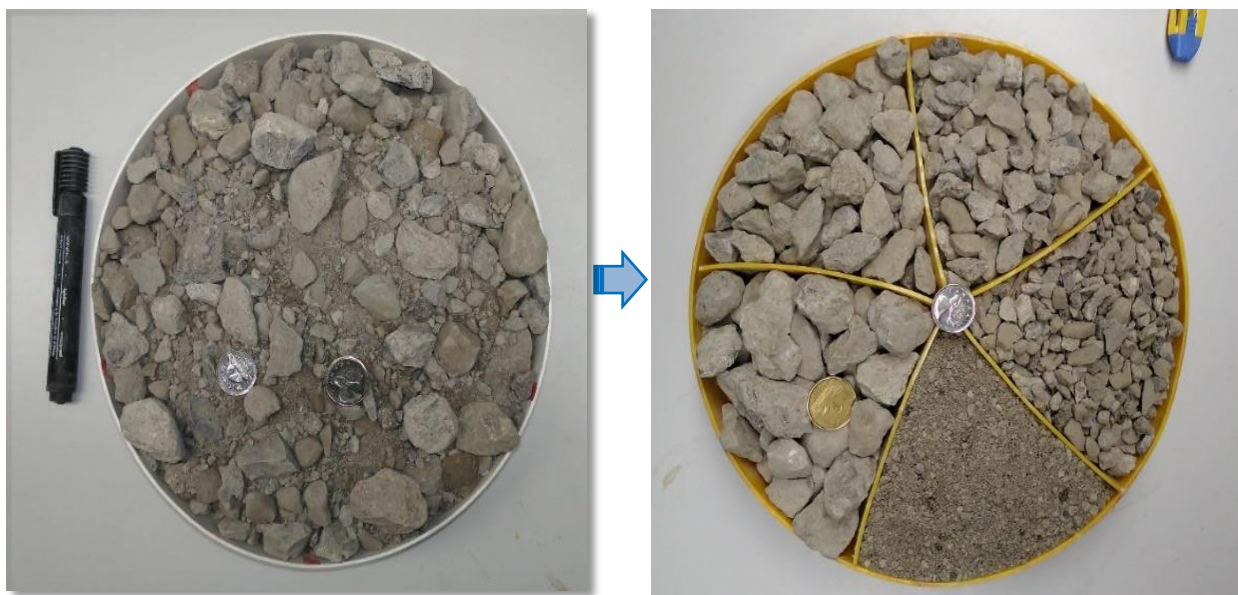


Figure 49 : Granulats recyclés MR-2 (0 - 31,5 mm) tamisés

La séparation des deux fractions (sable et gros granulat recyclé de MR-2) est effectuée par un tamiseur. On a observé que le tamiseur automatique développe une puissance plus élevée de tamisage que le tamis manuel. De plus, le temps nécessaire pour séparer des fractions est plus important par rapport à la quantité tamisée. À la fin du tamisage, on a déterminé les pourcentages de chaque fraction et les résultats sont présentés dans le tableau 22. La fraction inférieure à 5 mm (sable recyclé) constitue 41%, alors que la somme des fractions comprises entre 5 et 20 mm est de 47% et la fraction supérieure à 20 mm est de l'ordre 11%. On observe une quantité importante de sable recyclé. Le rapport sable/gros granulats de MR-2 (0-20 mm) est égal à 1.

Tableau 22 : Pourcentage des fractions des granulats recyclés de classe MR-2

Fractions MR-2 (31,5 mm)	Diamètre maximum en (mm)	Pourcentage (%)	Somme %
Gros Granulats MR-2 > 20 mm	$D_{\max} > 20 \text{ mm}$	11	-----
Gros Granulats MR-2 (5-20 mm)	$14 \text{ mm} < D_{\max} < 20 \text{ mm}$	15	47
	$10 \text{ mm} < D_{\max} < 14 \text{ mm}$	12	
	$05 \text{ mm} < D_{\max} < 10 \text{ mm}$	20	
Sable SR-2 (0-5 mm)	$0 \text{ mm} < D_{\max} < 05 \text{ mm}$	41	41

Tableau 23 : Rapport (sable / gros granulats) et (Gros granulats / somme de sable et gros granulats)

Ratio	S/G	S/(S+G)
MR-2 (0-20 mm)	1	0,50
MR-2 comme telle	0,78	0,58

Le rapport S/G représente le rapport massique des granulats fins sur le total des gros granulats. Par ailleurs, le rapport S/(S+G) représente le rapport massique des granulats fins sur la somme des gros granulats avec le sable. La Figure 50 présente les gros granulats recyclés de classe MR-2 (5-20 mm).



Figure 50 : Granulats recyclés MR-2 (5-20 mm)

4.1.1.3 Analyse granulométrique

L'analyse de la granulométrie a été effectuée à l'aide d'un tamiseur manuel selon la norme CSA A23.2-2A pour la fraction grossière de MR-2 (0–20 mm). Celle-ci a été exécutée suite au tamisage du granulat MR-2 (0-31,5 mm). Des échantillons sont lavés sur un tamis de 80 μm et séché dans un four à une température de 105°C pendant 24 heures avant l'essai. La courbe granulométrique du granulat recyclé MR-2 de diamètre maximal 20 mm est présenté dans la figure 51.

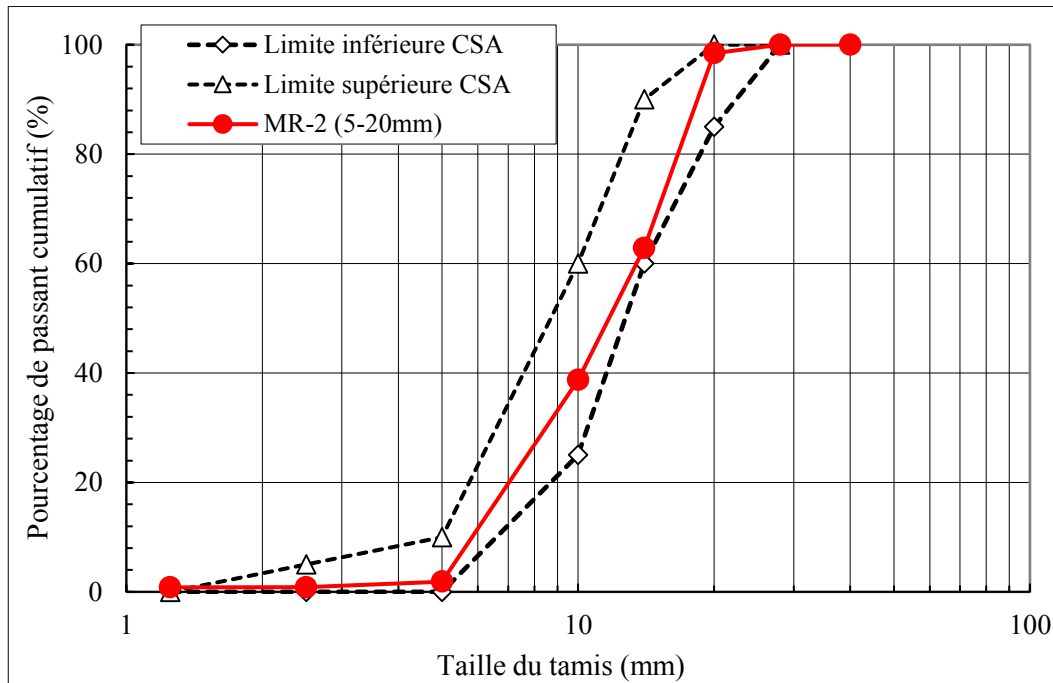


Figure 51 : Courbe granulométrique des granulats recyclés de classe MR-2 (5-20 mm)

La courbe granulométrique des granulats recyclés de classe MR-2 (5-20 mm) est incluse dans le fuseau normalisé recommandé par la norme CSA.A23. Le Tableau 24 résume les résultats de l'analyse granulométrique réalisée sur une série de tamis normalisée.

Tableau 24 : Résultats de l'analyse granulométrique du MR-2 (5-20 mm)

Gros granulat		Masse de prise de l'essai (g) : 1869,4			MR-2 (5-20 mm)		
Tamis	Refus	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats cumulés	Tamisats cumulés	Fuseau normalisé 5-20 mm	
(mm)	(G)	(G)	(%)	(%)	Total	Min	Max
40	0	0	0	100	0,0	100	100
28	0	0	0	100	0,0	100	100
20	28,9	28,9	2	98	1,5	85	100
14	665,5	694,4	37,1	62,9	37,1	60	90
10	451,1	1145,5	61,3	38,7	61,3	25	60
5	688,7	1834,2	98,1	1,9	98,1	0	10
2,5	19,10	1853,3	99,1	0,9	99,1	0	5
1,25	0,85	1854,1	99,2	0,8	99,2	0	0
PLAT	12,10	1866,2	99,8	0,2	99,8	/	/

La courbe granulométrique du sable recyclé de MR-2 est présentée dans la figure 52.

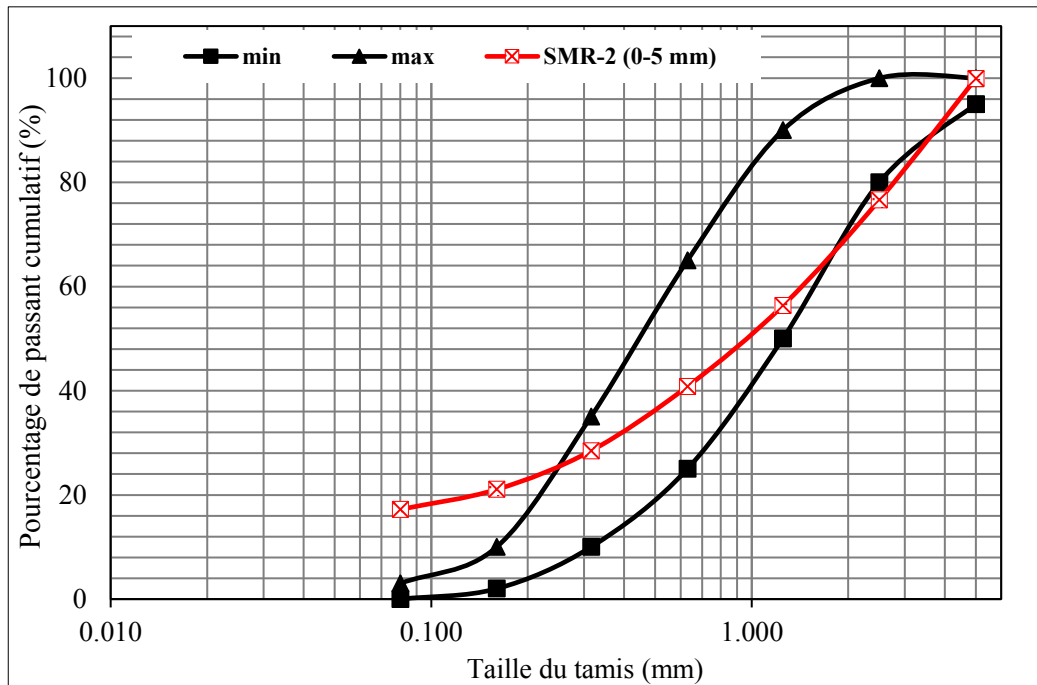


Figure 52 : Courbe granulométrique du sable recyclé de MR-2

Le Tableau 25 présente les résultats d'analyse granulométrique du sable recyclé.

Tableau 25 : Granulométrie du sable recyclé de MR-2 (0-5 mm)

Granulat fin		Masse de prise de l'essai (g) : 652,2				Fuseau normalisé 0-5 mm	
Tamis (mm)	Refus (G)	Refus Cumulés (G)	Refus Cumulés (%)	Tamisats Cumulés (%)	Tamisats Cumulés Total	Min	Max
10	0,00	0,00	0,00	100,00	652,2	100	100
5	0,4	0,4	0,06	99,94	651,8	95	100
2,5	152,2	152,6	23,40	76,60	500,0	80	100
1,25	132,2	284,8	43,67	56,33	367,4	50	90
0,630	101,2	386,0	59,18	40,82	266,2	25	65
0,315	80,6	466,6	71,54	28,46	185,6	10	35
0,160	48,3	514,9	78,95	21,05	137,3	2	10
0,080	25,0	539,9	82,78	17,22	112,3	0	3
PLAT	0,3	540,2	82,83	17,17	112,0	/	/
Module de finesse du sable recyclé			2,77				

Le module de finesse est calculé par la somme des refus cumulés en pourcentage (%) sur les tamis 5, 2,5, 1,25, 0,630, 0,315 et 0,160 mm. La Figure 53 présente les fractions de sable tamisé à l'aide d'un tamiseur automatique lors de l'analyse granulométrique.



Figure 53 : Fractions sable MR-2

4.1.1.4 Densité et absorption

La séparation du gros granulat (GR) recyclé de MR-2 et du sable (SR) nous a permis de caractériser chacun séparément. Le Tableau 26 présente les densités et les absorptions de SR et GR ainsi que le module de finesse du SR.

Tableau 26 : Densité et absorption de SR et GR

Densité et absorption MR-2	SR 0-5 mm	GR 5-20 mm
Densité brute (Db)	2,30	2,38
Densité sss (Dss)	2,41	2,49
Densité apparente (Da)	2,58	2,67
Absorption (Abs)	4,85	4,58
Mf Sable	2,77	/

La densité à l'état SSS des gros granulats recyclés est plus grande que celle du sable recyclé SMR (0-5 mm). Par contre, l'absorption de GMR-2 (5-20 mm) est plus faible que celle du SMR-2 (0-5 mm). L'absorption du SMR-2 (0-5 mm) est de 4,85%. Cette valeur relativement élevée par rapport à celle des GR qui est due probablement aux quantités importantes des particules fines.

4.1.1.5 Cinétique d'absorption des deux fractions SMR-2 et GRM-2

Le mortier résiduel qui enrobe le granulat recyclé est le point de faiblesse du granulat recyclé qui affecte ses propriétés mécaniques, notamment la rhéologie et l'ouvrabilité du béton autoplaçant à cause de la forte absorption d'eau. Cela nous oblige alors à déterminer la cinétique d'absorption, la vitesse et la quantité d'eau absorbée des gros granulats recyclés GMR-2 (5-20 mm) et du sable recyclé SMR-2 (0-5 mm). Pour la détermination de la cinétique d'absorption et le temps nécessaire de saturation du granulat recyclé, on a effectué un essai simple (Figure 54). Il s'agit de réaliser une pesée hydrostatique sur trois échantillons, SMR-2 (0-5 mm), GMR-2 (5-20 mm) et MR-2. Cet essai a été développé initialement par Djerbi Teggeur en 2012 pour quantifier la cinétique d'absorption des gros granulats. [Boulay, 2014] et [Turanu, 2016] ont utilisé le même essai. Dans notre cas, on a estimé la cinétique d'absorption du sable et du gros granulat recyclé pour faire la comparaison. Une quantité de 2 kg a été mise dans un tamis couvert avec un tissu, pour ne pas perdre les petites particules. Ce tamis est attaché à une balance qui est immergée dans l'eau.

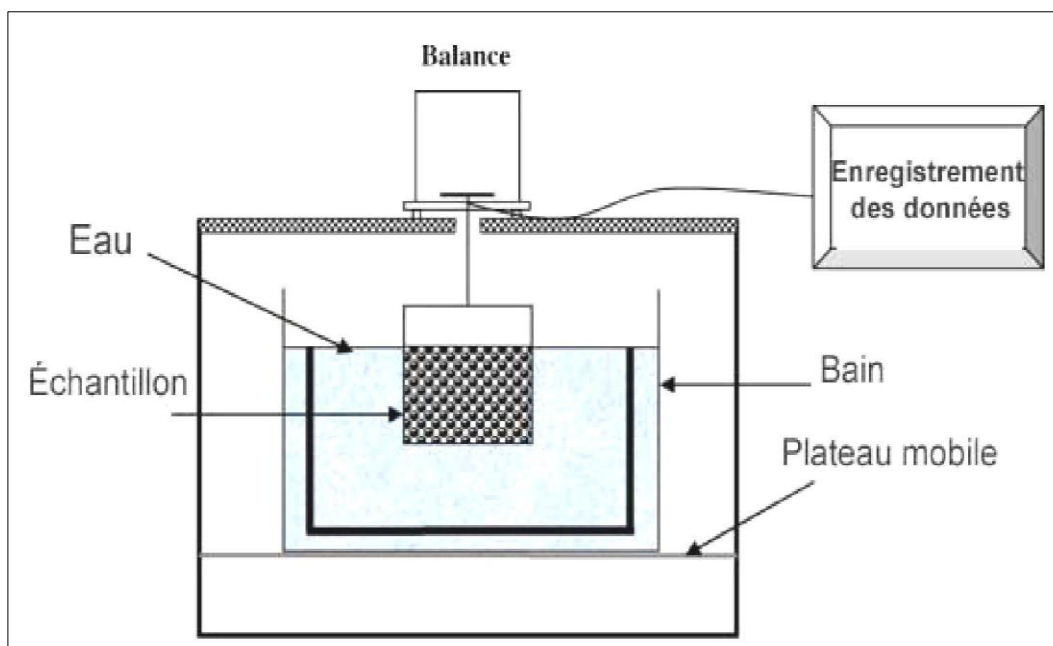


Figure 54 : Pesée hydrostatique [Djerbi Tegguer, 2012 ; Turcanu, 2016 ; Jennifer, 2016]

L'analyse consiste à déterminer la masse de l'échantillon en fonction du temps. L'essai débute à un temps initial T_0 égale à 30 secondes. Le pourcentage en poids de l'absorption est déterminé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{ABS (\%)} = \frac{\text{Masse } T_n - \text{Masse } T_0}{\text{Masse F} - \text{Masse } T_0} \times 100 \text{ [\%]} \quad \text{Équation (9)}$$

Où :

ABS est l'absorption ;

M_{T_n} est la masse de l'échantillon dans l'eau à temps t_n ;

M_{T_0} est la masse de l'échantillon au temps égale à 30 secondes ;

M_F est la masse de l'échantillon au temps final.

Les résultats obtenus sur les trois échantillons nous ont permis de déterminer la vitesse d'absorption du sable recyclé de MR-2 (0-5 mm). Les résultats obtenus montrent que l'absorption du sable recyclé est supérieure à celles du gros granulat recyclé (5-20 mm) et le MR-2 (0-31,5 mm). Il est également observé que les vitesses d'absorption des MR-2 (0-31,5 mm) et SMR-2 (0-5 mm) augmentent rapidement dès la première seconde et restent constantes pendant 12 minutes. Par ailleurs, les granulats GMR-2 (5-20 mm) montre une absorption plus lente par rapport aux deux autres fractions et se stabilise après 20 minutes. En général, la vitesse d'absorption des trois échantillons commence à ralentir après 7 minutes. L'absorption du SMR-2 est de l'ordre de 70 %

après 12 minutes, alors que celle du gros granulat GMR-2 est de 35 %. La figure 55 présente la vitesse d'absorption des deux fractions séparément, sable recyclé et gros granulat recyclé, et du MR-2 (0-20 mm). Par ailleurs, la figure 56 présente la cinétique d'absorption des deux fractions séparément, sable recyclé et gros granulat.

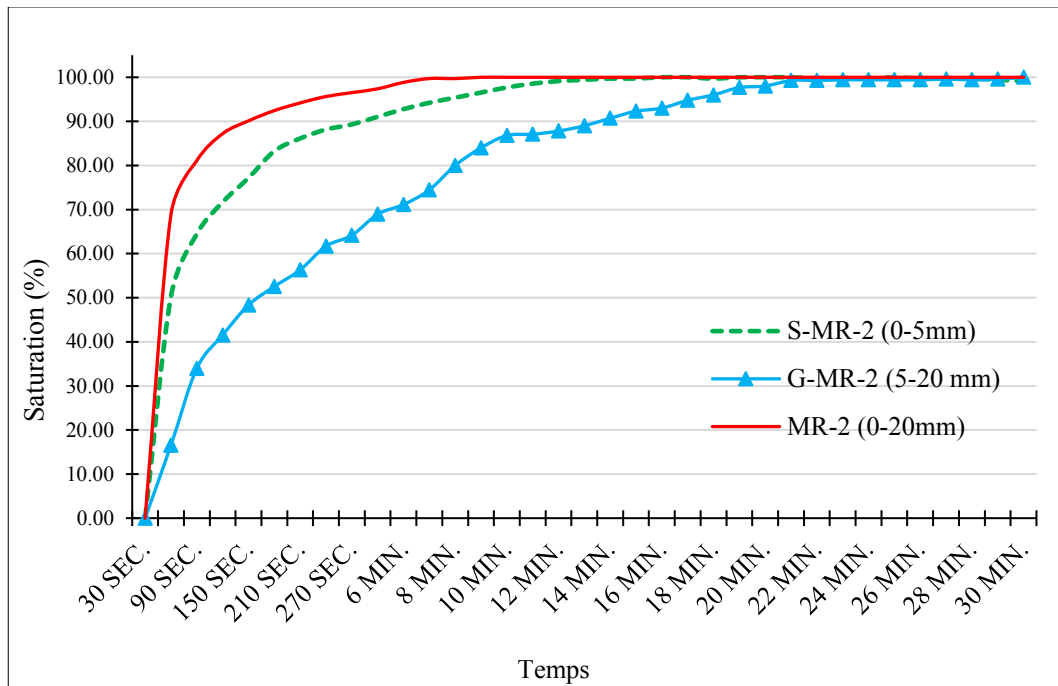


Figure 55 : Vitesse d'absorption des SMR-2, GMR-2 et MR-2 en fonction du temps

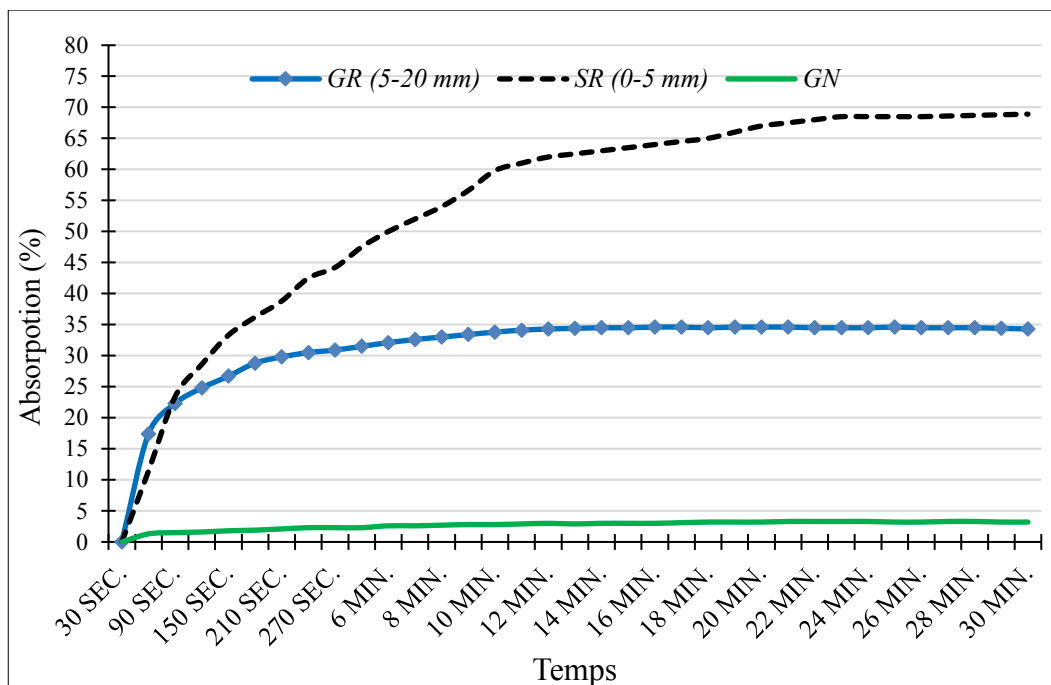


Figure 56 : Cinétique d'absorption des SMR-2, GMR-2 et GN

D'après les figures 55 et 56, on constate que le MR-2 a une forte absorption, ce qui peut avoir un effet significatif sur la rhéologie et l'ouvrabilité pendant et après le malaxage du béton. Il est possible d'observer que les granulats fins sont plus absorbants que les gros granulats. Afin d'éliminer l'absorption de l'eau de gâchage pendant le malaxage par les GR, les GR sont saturés pendant 24 heures avant la production du béton. Dans la deuxième phase de cette étude, il s'agit d'évaluer l'effet bénéfique de la saturation des granulats recyclés sur la maniabilité du béton. Les résultats obtenus sur des bétons fabriqués avec des granulats recyclés secs et saturés seront présentés dans la Phase (III) de cette étude.

4.2 Phase II - Étude paramétrique sur un béton autoplaçant

Dans le cadre de la Phase (II) de cette étude, une étude paramétrique sur un béton autoplaçant (BAP) proportionné avec un rapport (E/L) égale à 0,35 et un liant ternaire de type TerC³ a été réalisée pour évaluer l'impact des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP aux granulats recyclés. Il s'agit notamment d'étudier l'effet du squelette granulaire, le taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés.

4.2.1.1 Courbes granulométriques utilisées pour la production des bétons autoplaçants

À la suite de l'optimisation de la granulométrie des matériaux recyclés MR-2 (0-20 mm) et naturels, les courbes granulométriques des matériaux combinés pour la production des BAP sont déterminées. Ces courbes sont obtenues en utilisant la courbe optimale de Fuller Thompson ($n = 0,45$). Il s'agit de trouver la courbe optimale proche de la courbe visée et incluse dans le fuseau normalisée selon la norme CSA. La courbe optimale est constituée de 50 % de sable et 50% de gros granulat. Les taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés utilisés sont 20%, 35% et 50% (Figure 57).

La Figure 58 présente les proportions des formulations étudiées dans la Phase (IV) de cette étude.

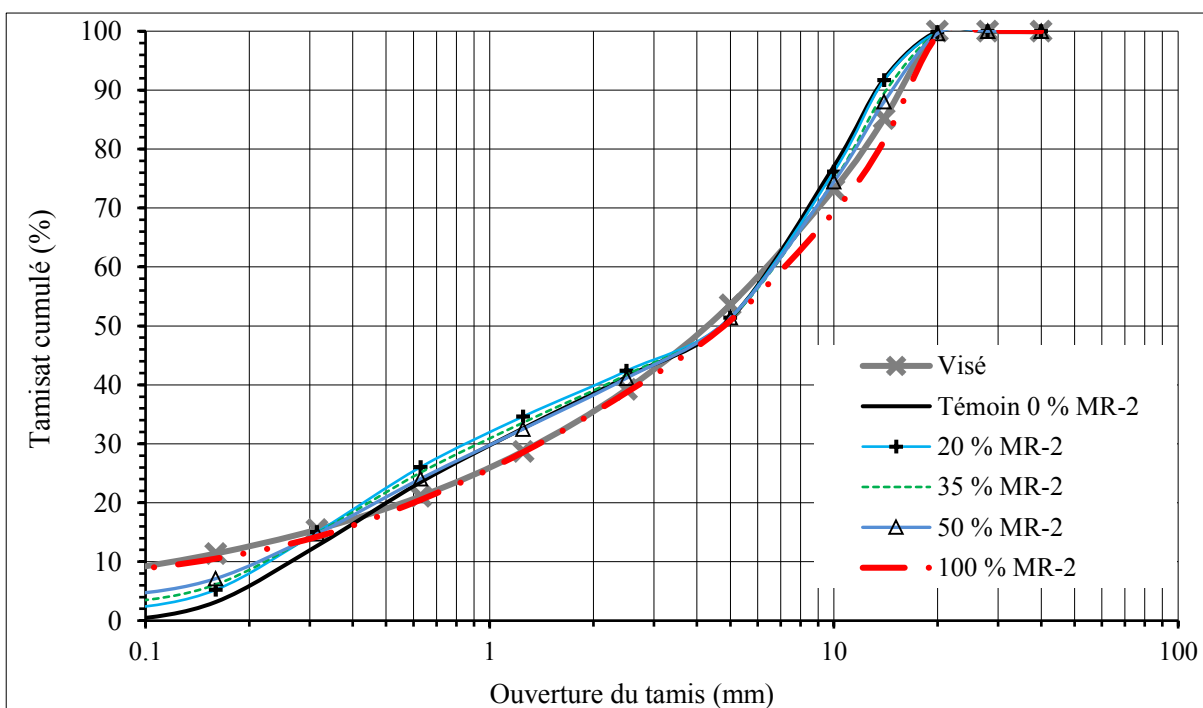


Figure 57 : Optimisation granulométrique des matériaux pour la production du BAP

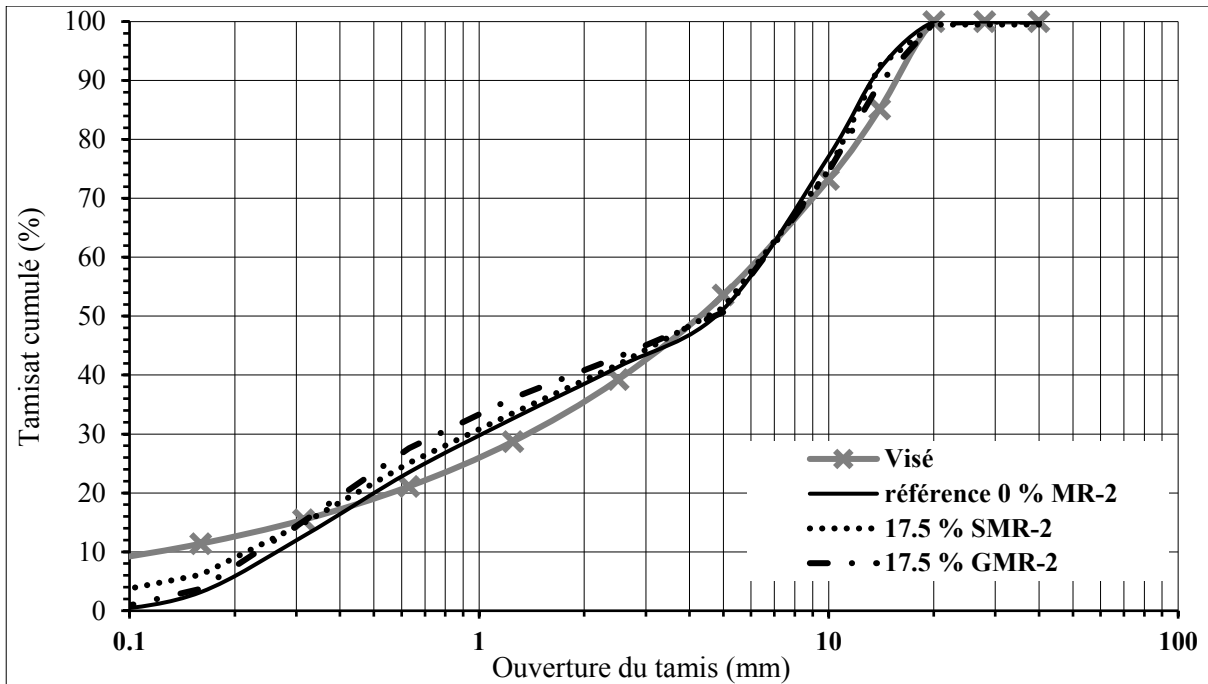


Figure 58 : Optimisation granulométrique des matériaux pour la production du BAP (17,5% SMR-2 et 17,5% GMR-2)

4.2.1.2 Proportions des MR-2

Les taux de remplacement des granulats naturel par le MR-2 sont de 20%, 35% et 50 %. Par ailleurs, le remplacement du sable naturel par le sable recyclé est de 17,5%. Le Tableau 27 présente les proportions des matériaux utilisés pour la confection de chaque béton selon le taux de remplacement des granulats recyclés.

Tableau 27 : Les proportions des granulats nécessaires à la production des bétons autoplaçants étudiés

Taux de remplacement MR-2		0%	20%	35%	50%	17.5% SMR-2	17.5 % GMR-2
Pierre 5-14 mm	Kg	40	28	22,5	15	39,5	22,5
Pierre 10 mm		10	13	10	10	10	10
Sable naturel		50	39	32,5	25	32,5	50
GMR-2 (5-20 mm)		0	9	17,5	25	0	17,5
SMR-2 (0-5mm)		0	11	17,5	25	17,5	0

4.2.2 Formulations et propriétés des BAP étudiés

Dans cette section, il s'agit de présenter les formulations des BPA aux granulats recyclés étudiés, la méthode de production, la préparation des GR avant la confection du béton, la séquence de malaxage, les propriétés rhéologiques, les propriétés mécaniques et la durabilité.

4.2.2.1 Formulations des bétons autoplaçants

La formulation de béton autoplaçant est optimisée selon les données obtenues lors de la caractérisation des matériaux. Le squelette granulaire, les proportions de gros granulats et le sable ainsi que le volume de la pâte et la teneur en ciment sont déterminés. Le BAP étudié est formulé avec un rapport E/C de 0,35. Les granulats recyclés de type MR-2 sont utilisés à des taux de remplacement de 20%, 35% et 50%. Les proportions des matériaux utilisés pour la confection d'un mètre cube (1m³) de BAP sont présentées dans le tableau 28.

Tableau 28 : Proportions des BAP étudiés

Proportions des BAP étudiés BAP					
		1 m ³ de BAP (E/L = 0,35)			
Matériaux	Unité	0 % MR-2	20% MR-2	35% MR-2	50% MR-2
Liant TerC ³	M (kg)	420	420	420	420
	V (L)	136	136	136	136
Eau	M (kg)	148	148	148	148
	V (L)	148	148	148	148
GGN 5-10 mm	M (kg)	179	127	88,5	50
	V (L)	65	46	32	18
GGN 5-14 mm	M (kg)	702	592	509	427
	V (L)	260	219	189	158
GFN 0-5 mm	M (kg)	891	734	616	499
	V (L)	325	268	225	182
GGR MR-2 (5-20 mm)	M (kg)	0	162	283	404
	V (L)	0	65	114	1623
GFR MR-2 (0-5 mm)	M (kg)	0	157	274	392
	V (L)	0	65	114	162
SP (L)	M (kg)	2,8	2,8	2,8	2,8
	V (L)	2,6	2,6	2,6	2,6
AEA (L)	V (L)	0,7	0,7	0,7	0,7
	V air	60	60	60	60
Masse total	Kg	2351	2351	2352	2352
Volume total	L	1000	1013	1023	1033
Masse Volumique théorique	Kg/m ³	2352	2321	2298	2276

4.2.3 Préparation des matériaux et production des bétons autoplaçants

Dans cette partie, on présente la procédure de préparation des matériaux et la saturation des granulats recyclés. Les BAP ont été préparés dans un malaxeur d'une capacité de 120 Litres. Les matériaux utilisés sont dans un état saturé à surface sèche (SSS). Les granulats recyclés de classe MR-2 sont séparés en deux fractions : des gros granulats de diamètre maximum 20 mm et un sable recyclé (particules inférieures à 5 mm). Les matériaux sont conservés au laboratoire à une température ambiante de 23°C. Par ailleurs, les granulats recyclés sont immergés dans l'eau 24 heures avant la confection des BAP. Après cette étape, on a déterminé la teneur en eau pour faire la correction et fixé le rapport E/L (Figure 60). La Figure 59 présente l'état des granulats recyclés avant la préparation des BAP. Les granulats saturés sont, par la suite, placés sur un tamis couvert par un tissu perméable pour filtrer l'eau et ne pas perdre les particules fines. Les GR ainsi obtenus sont à l'état SSH (saturée surface humide).



Figure 59 : Pré-saturation et l'état des granulats recyclés avant la confection des bétons

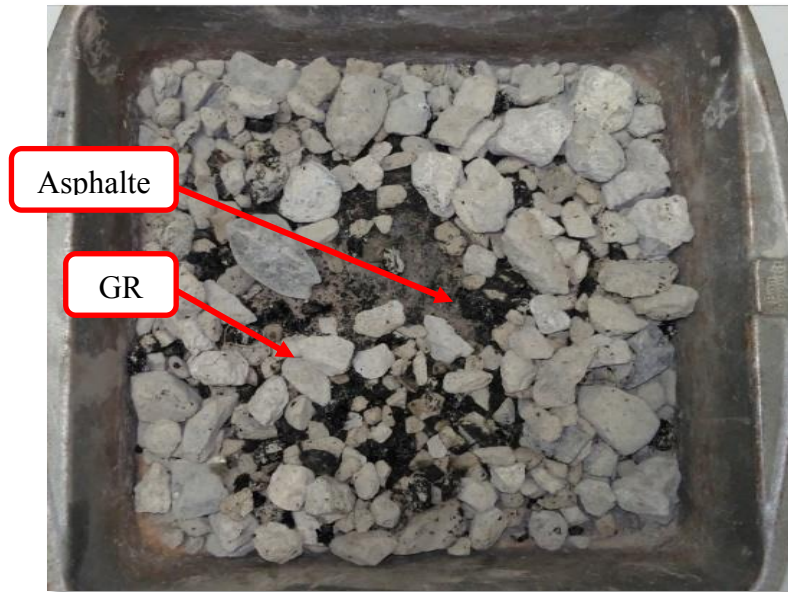


Figure 60 : Granulats recyclés lors de la correction de la teneur en eau

4.2.4 Séquence de malaxage

Le malaxage a été effectué dans un malaxeur d'une capacité de 120 litres. La littérature indique qu'il y a plusieurs types de malaxage et le temps nécessaire d'introduction des granulats recyclés. La séquence de malaxage utilisée lors de la production de béton à base de granulats recyclés saturés et non saturés est la méthode en deux étapes. Étant donné que les granulats recyclés non saturés sont très absorbant, ce qui influence la quantité de l'eau de malaxage, la maniabilité, la rhéologie et la demande en superplastifiant, qui peut être absorbé par les granulats recyclés non saturé, il est important d'utiliser les GR dans un état saturé.

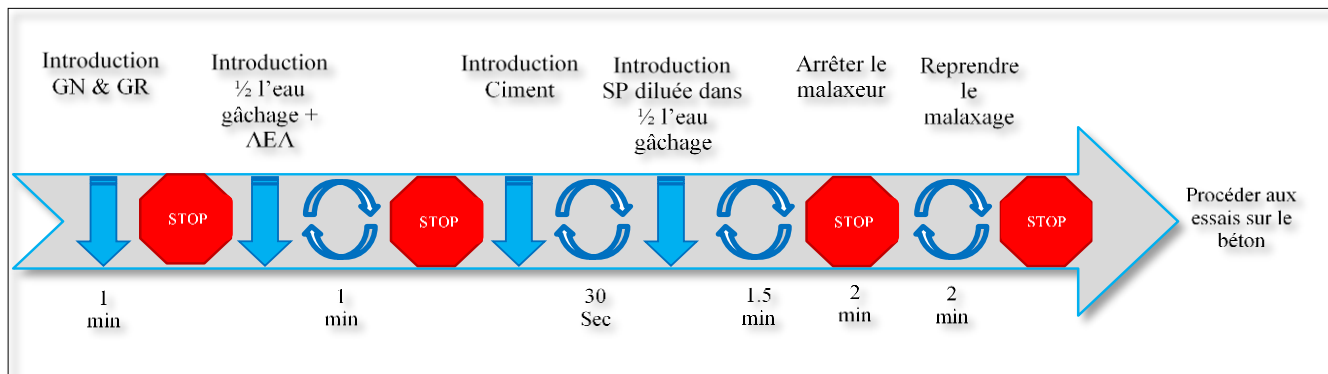


Figure 61 : Séquence de malaxage en deux étapes

4.2.5 Résultats à l'état frais

4.2.5.1 Masse volumique

La masse volumique est variable d'un mélange à l'autre selon la teneur en air et le taux de remplacement des GR. Ceci est probablement dû à la densité des matériaux utilisés (dsss GR < dsss GN, dsss SR < dsss SN). La densité des GR saturés d'eau est plus importante que celle des GR non saturés, car les pores sont remplis d'eau. Les résultats des masses volumiques et des teneurs en air de chaque béton sont présentés dans le tableau 29.

Tableau 29 : Masses volumiques et teneurs en air des BAP étudiés

Type des BAP	Air (%)	Masse volumique des BAP à l'état frais (kg/m ³)
Témoin	7,0	2387
20% MR-2-S	7,3	2361
35% MR-2-S	7,8	2310
50 % MR-2-S	8,2	2254

La masse volumique des bétons varie en fonction du taux de remplacement de MR-2 (0-20 mm) et des densités des matériaux. La Figure 62 représente les résultats des masses volumiques des différents BAP étudiés.

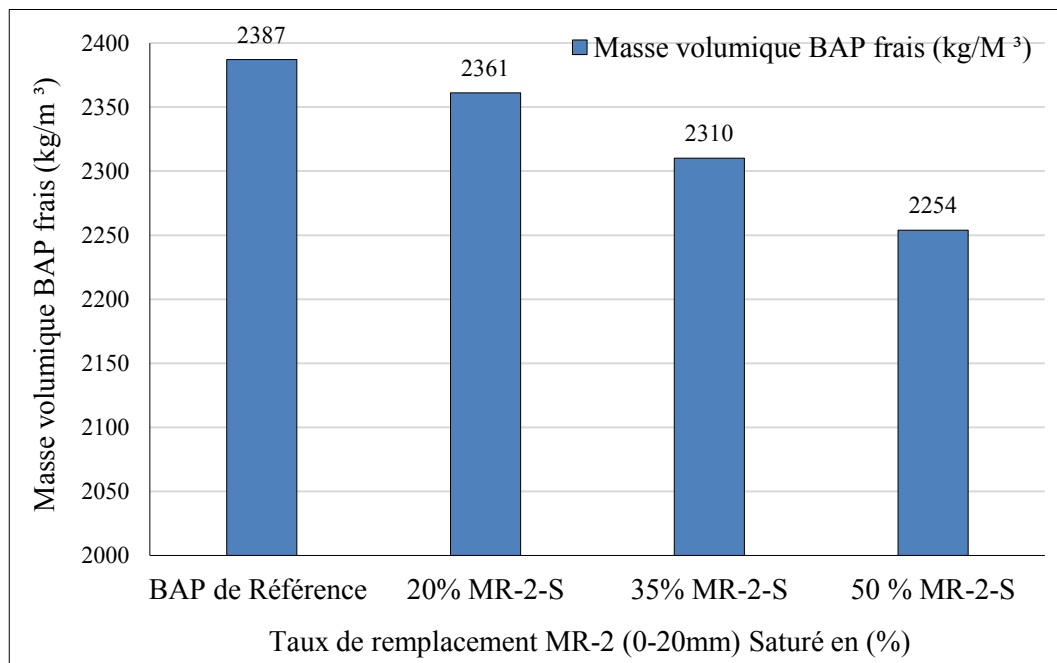


Figure 62 : Masses volumiques des BAP étudiés

Les bétons à base de granulats recyclés ont une masse volumique plus faible que celle des BAP de référence (0% de MR-2). La diminution de la masse volumique des BAP augmente avec le taux de remplacement des granulats naturels par les GR.

4.2.5.2 Demande en superplastifiant

La Figure 63 montre la demande en superplastifiant des BAP étudiés pour atteindre l'étalement visé de 660 ± 50 mm. On constate que pour un étalement donné, la demande en SP augmente systématiquement avec l'augmentation de la teneur des granulats recyclés saturés.

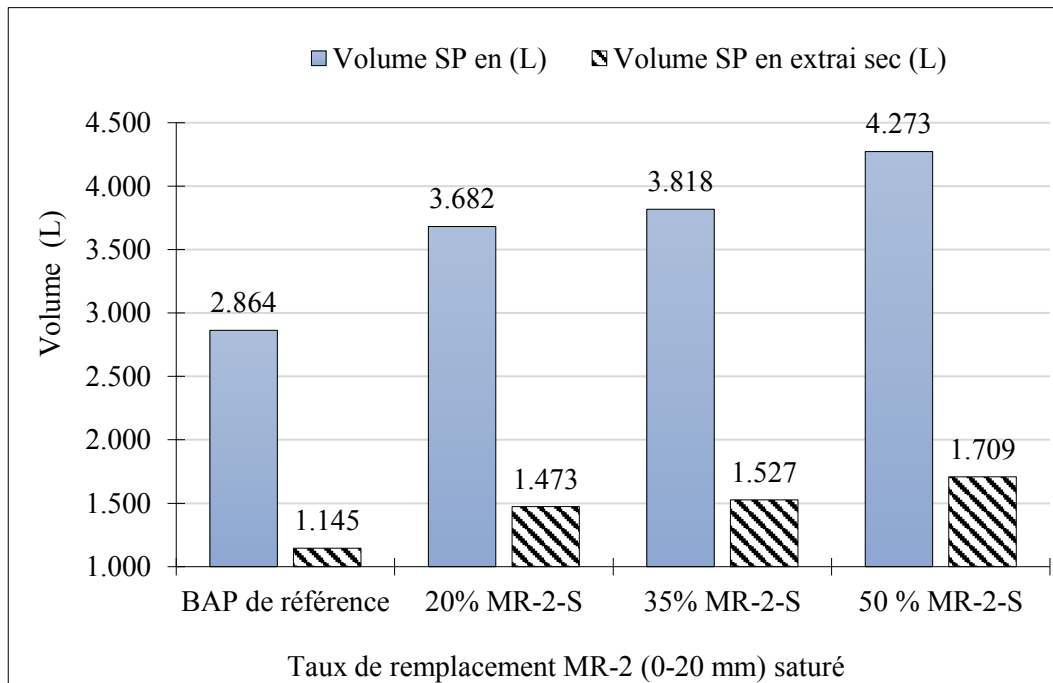


Figure 63 : Teneur en SP pour des bétons étudiés avec GR saturés (E/L=0,35)

Le Tableau 30 présente les résultats de la demande en SP pour la confection de 110 L et 1 m³ des formulations de BAP étudiées.

Tableau 30 : Demande en superplastifiant pour la formulation de 110 L et 1 m³ de BAP

	Teneur en SP					
	110 L de BAP			1 m ³ de BAP		
	Volume Sp en (L)	Volume Sp en extrait sec (L)	Masse Sp extrait sec (kg)	Volume Sp en (L)	Volume Sp en extrait sec (L)	Masse Sp en extrait sec (kg)
Témoin	0,315	0,126	0,136	2,864	1,145	1,237
20% MR-2-S	0,405	0,162	0,175	3,682	1,473	1,591
35% MR-2-S	0,420	0,168	0,181	3,818	1,527	1,649
50 % MR-2-S	0,470	0,188	0,203	4,273	1,709	1,846

4.2.5.3 Étalement / J-Ring

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par leur comportement à l'état frais, un seuil de cisaillement faible et une viscosité modérée, ce qui permet d'obtenir un étalement homogène sous l'effet de son propre poids, même au travers des armatures sans blocage, sans utilisation de vibration. Après 8 minutes de malaxage, l'étalement et le temps d'écoulement nécessaire pour atteindre un étalement de 500 mm (T_{50}) sont déterminés. Les résultats de l'étalement, T_{50} et J-Ring sont présentés dans le tableau 31.

Tableau 31 : Résultats des étalements, T_{50} et J-ring des BAP étudiés dans la Phase (1)

BAP	T_{50} (s)	Étalement (mm)	J-ring (mm)	Étalement – J-ring < 50 mm (mm)
Témoin	4,00	720	680	40
20% MR-2-S	3,50	715	665	50
35% MR-2-S	3,10	715	670	42
50 % MR-2-S	3,39	610	575	35

On constate que tous les BAP étudiés ont atteint l'étalement visé de 660 ± 50 mm en utilisant le même type de superplastifiant. Pour chaque formulation de BAP, le dosage de SP est ajusté pour obtenir l'étalement visé. Les BAP contenant des granulats recyclés (20% MR-2 et 35% MR-2) ont un étalement plus proche que celui du BAP de référence. Cependant, le BAP formulé avec 50% de MR-2 montre un étalement inférieur. Le BAP a une bonne capacité de passage si la différence entre l'étalement et le J-ring est inférieure à 50 mm [ASTM C 1611 et ACI 237]. Les résultats présentés dans le tableau 31 montrent que les bétons étudiés respectent cette condition (c'est-à-dire étalement – J-ring < 50 mm). La Figure 65 présente les résultats de l'étalement et du J-ring obtenus.

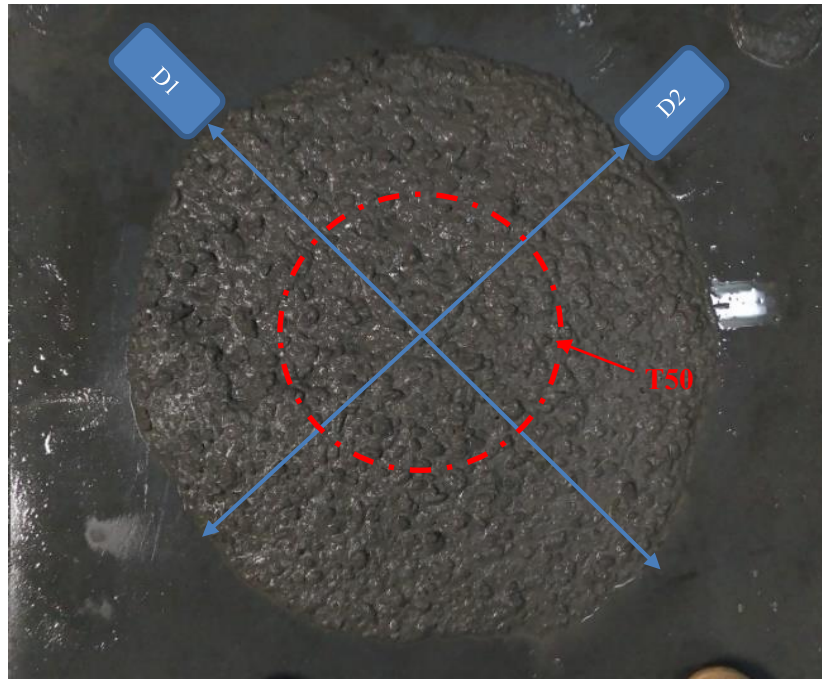


Figure 64 : Essais de l'étalement des BAP étudiés

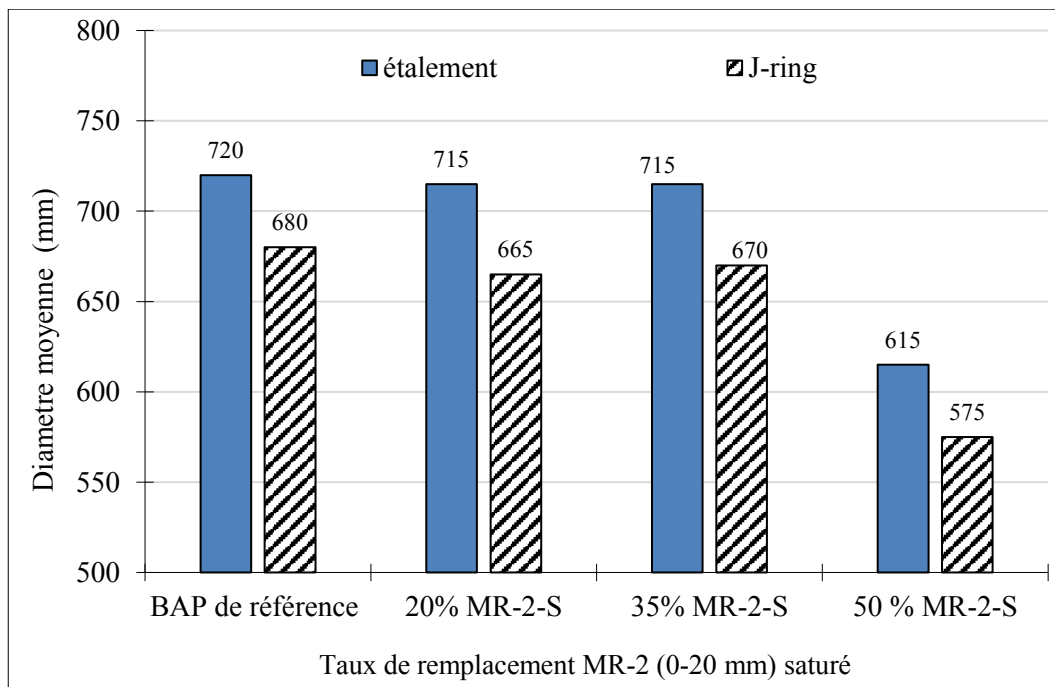


Figure 65 : Résultats de l'étalement et le J-ring des bétons étudiés

4.2.6 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques évaluées sont :

- ✓ La résistance à la compression à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours ;

- ✓ La résistance à la traction par fendage (essai brésilien) à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours ;
- ✓ La résistance en flexion à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours ;
- ✓ Le module d'élasticité à 28, 56 et 91 jours.
- ✓ Fluage à la compression béton témoin et à 35 % de MR-2 ;
- ✓ Qualité d'adhérence des BAP de réparation.

4.2.6.1 Résistance à la compression

Pour chaque formulation de BAP, des cylindres de dimensions 100 x 200 mm sont échantillonnés et utilisés pour déterminer les résistances à la compression à différents âges. Chaque valeur est calculée comme une moyenne de trois différentes mesures. Le Tableau 32 résume tous les résultants des résistances à la compression à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours.

Tableau 32 : Résistances à la compression des bétons étudiés à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours

E/L = 0,35	Age (jour)	3	7	14	28	56	91
1	BAP de référence	50 (1,1)	52 (1,8)	58 (3,9)	68 (0,6)	76 (1,2)	77 (1,2)
2	20% MR-2 S	33 (1,9)	42 (3,4)	47 (1,9)	56 (2,9)	58 (2,2)	61 (3,2)
3	35% MR-2 S	31 (1,1)	40 (5)	45 (1,8)	50 (2,6)	52 (0,7)	55 (0,7)
4	50% MR-2 S	30 (1,3)	35 (0,4)	42 (0,4)	48 (2,4)	50 (3,5)	53 (1,8)

Les résultats des résistances à la compression des BAP étudiés (BAP de référence, 20 % MR-2, 35 % MR-2 et 50% MR-2) à 28, 56 et 91 jours sont illustrés dans la figure 66.

Pour un âge donné, l'incorporation des granulats recyclés cause une réduction de la résistance à la compression par rapport au BAP témoin. De plus, cette réduction augmente avec le taux de remplacement des GR. Par exemple, l'incorporation de 20% cause une réduction de la résistance à la compression à 28 jours de 69 à 56 MPa (18%), cette réduction est à partir de 26% et 29% dans le cas de 35% et 50% de remplacement. On observe aussi une évolution de la résistance à la compression de tous les bétons étudiés en fonction de l'âge. Tous les BAP étudiés ont une résistance supérieure à 50 MPa à 56 jours.

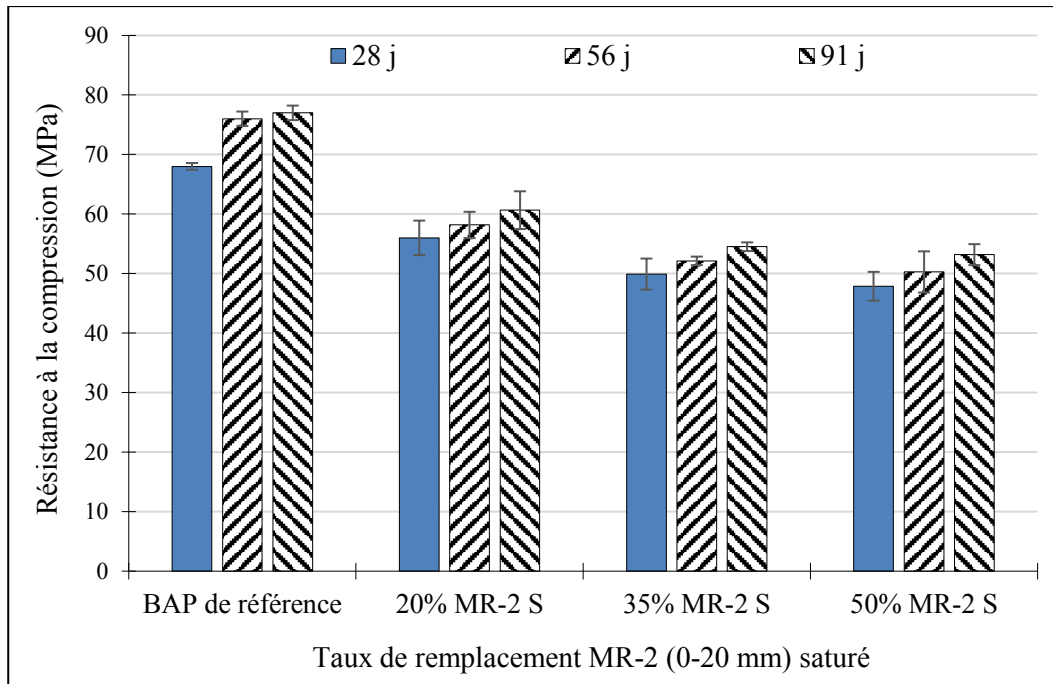


Figure 66 : Gain des Résistances à la compression des BAP contenant différents teneurs en de granulats recyclés de classe MR-2

4.2.6.2 Résistance à la traction par fendage

Les résultats de la résistance à la traction par fendage des BAP étudiés à différents âges de mûrissement sont présentés dans le tableau 33.

Tableau 33 : Résistances à la traction des bétons étudiés à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours

BAP E/C = 0,35	Age (jour)	3 j	7 j	14 j	28 j	56 j	91
1	BAP de référence	4,6 (0,2)	5,1 (0,6)	5,4 (0,2)	5,8 (0,5)	6,1 (0,8)	6,3 (0,1)
2	20% MR-2 S	3,7 (0,3)	4,0 (0,2)	4,3 (0,3)	4,8 (0,2)	5,0 (0,1)	5,1 (0,2)
3	35% MR-2 S	3,5 (0,3)	3,8 (0,4)	4,3 (0,3)	4,6 (0,4)	4,9 (0,9)	5,0 (0,6)
4	50% MR-2 S	3,2 (0,3)	3,8 (0,3)	4,1 (0,2)	4,5 (0,4)	4,7 (0,2)	5,0 (2,6)

La Figure 67 présente le gain de la résistance à la traction par fendage à 28, 56 et 91 jours.

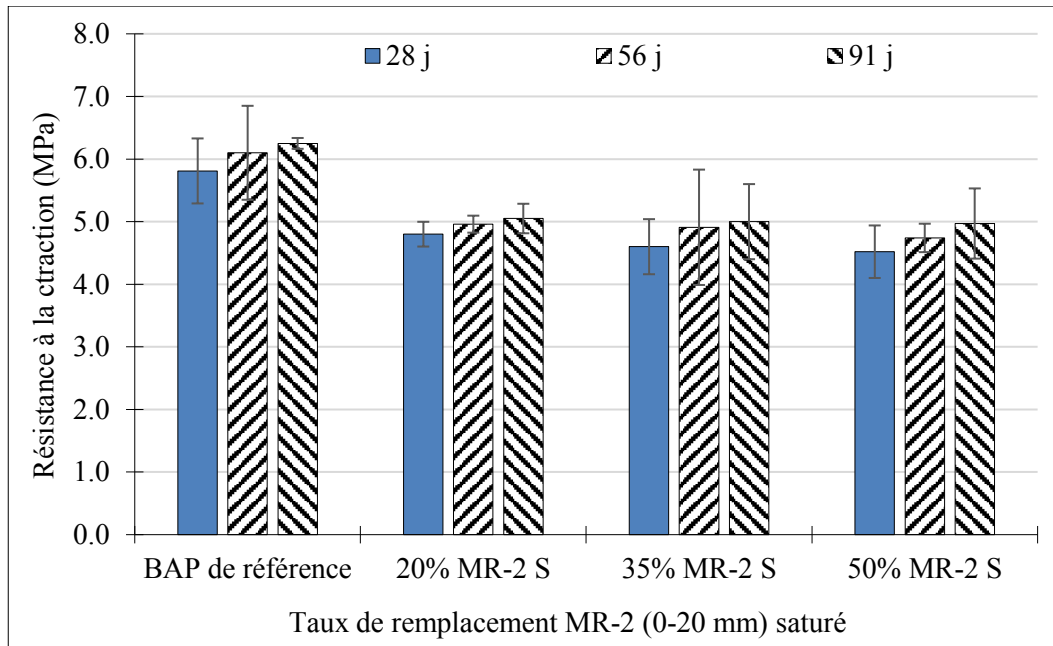


Figure 67 : Gain des Résistances à la traction par fendage des BAP contenant différentes teneurs de GR de classe MR-2

Le béton de référence a développé la résistance à la traction par fendage la plus importante par rapport aux BAP contenant des GR de classe MR-2. L'incorporation de 20% de granulat recyclé cause une réduction de la résistance à la compression de 18% (de 5,8 à 4,8 MPa). Par ailleurs, au-delà de 35% de substitution, la réduction est limitée entre 20% à 23%. À un âge donné, les BAP aux granulats recyclés développent des résistances similaires indépendamment du taux de substitution de 20% à 50%.

La Figure 68 présente différents types de rupture sur un cylindre de 100 x 200 mm soumis à un essai de traction par fendage. On remarque également une bonne répartition des gros granulats le long du cylindre. On constate que la rupture survient au niveau de l'ancienne interface pâte/granulat.

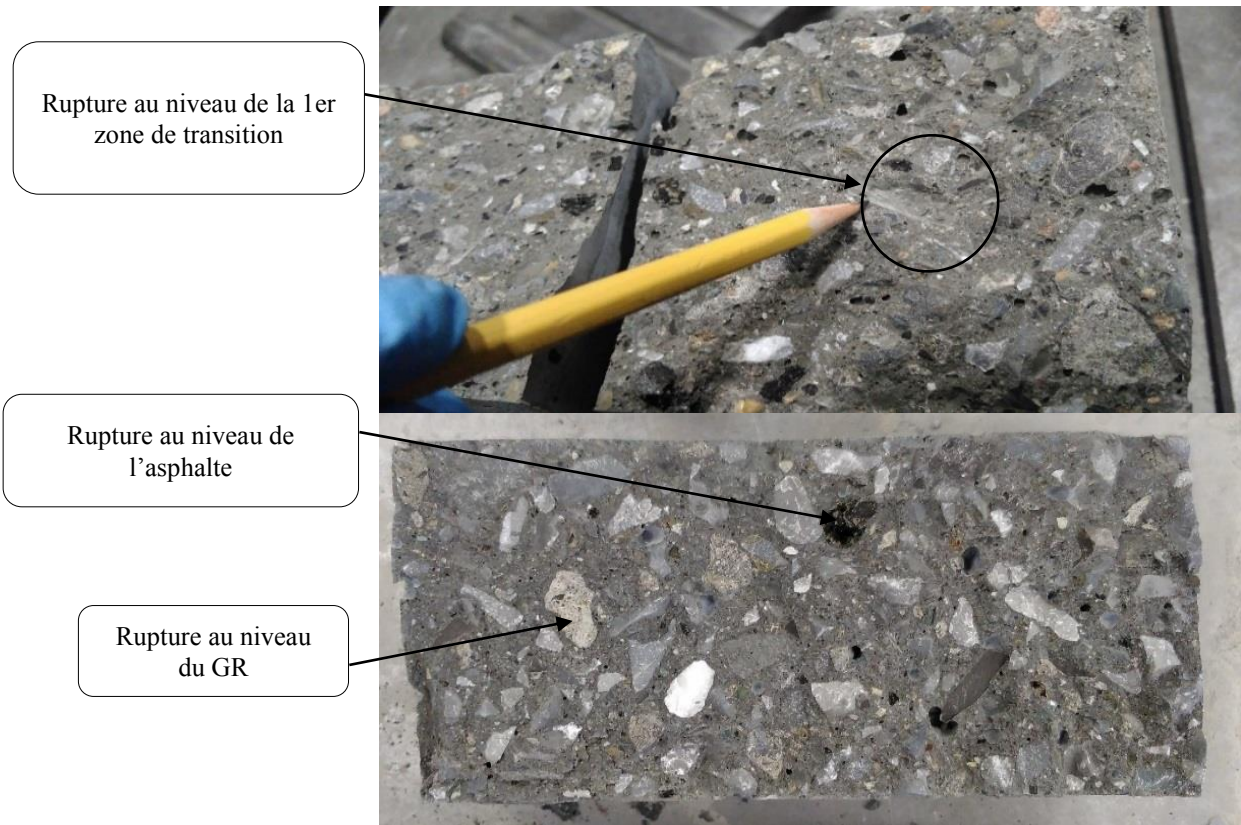


Figure 68 : Coupe longitudinale sur un demi-cylindre soumis à un essai de traction par fendage

4.2.6.3 Résistance en flexion

Les résultats des résistances en flexion déterminés à 28, 56 et 91 jours sont illustrés sur la figure 69. Chaque valeur représente une moyenne de deux mesures. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 34.

Tableau 34 : Résistances en flexion (en MPa) des BAP étudiés à différents âges

	Résistances en flexion (MPa)					
Age (jours)	3 j	7 j	14 j	28 j	56 j	91 j
BAP de référence	5,8 (0,3)	6,5 (0,9)	7,0 (0,1)	7,8 (0,3)	8,8 (0,4)	10,2 (0,3)
20% MR-2 S	4,8 (0,3)	5,8 (0,5)	6,4 (0,1)	6,7 (0,4)	7,1 (0,2)	7,6 (0,2)
35% MR-2 S	4,1 (0,2)	4,7 (0,3)	5,4 (0,4)	5,7 (0,1)	6,2 (0,2)	6,9 (0,6)
50% MR-2 S	3,9 (0,3)	4,3 (0,2)	4,8 (0,6)	5,3 (0,1)	5,9 (0,2)	6,5 (0,1)

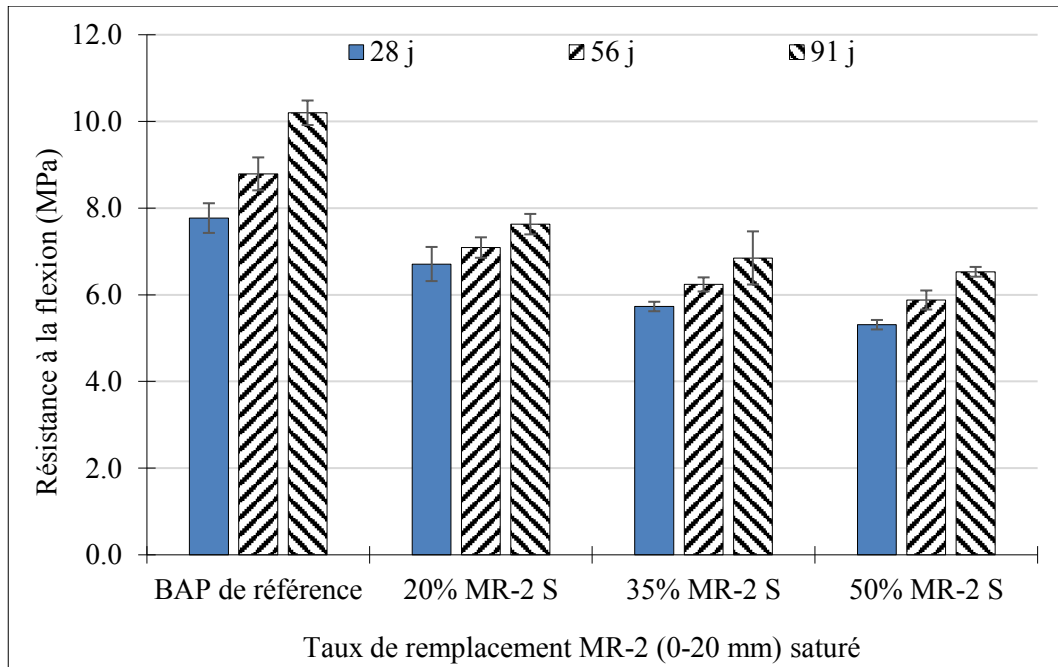


Figure 69 : Gain des Résistances en flexion des bétons étudiés

On observe que l'incorporation des granulats recyclés diminue la résistance en flexion. Par exemple, l'utilisation de 20% des GR diminue la résistance en flexion de 7,8 à 6,7 MPa (14%) dans le cas des taux de remplacement de 35% et 50%, cette réduction est % et % respectivement. La diminution de la résistance augmente avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés. On observe également une évolution de la résistance en flexion en fonction de l'âge sur tous les bétons étudiés. La Figure 70 montre une poutre de (100x100x400 mm) lors de l'essai de flexion.

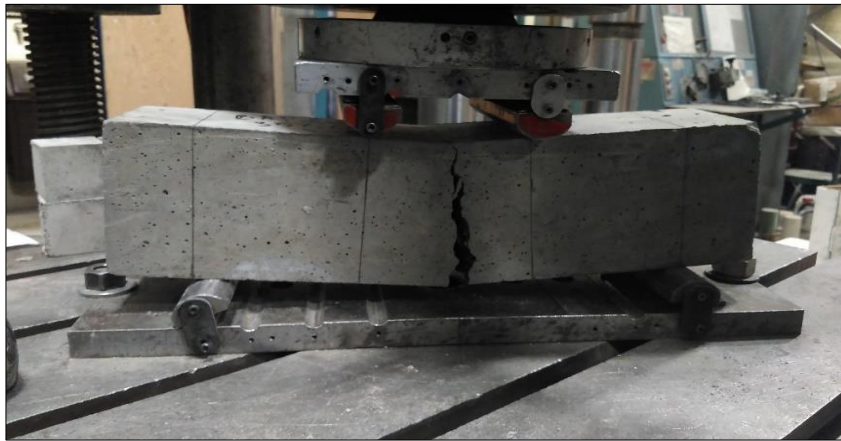


Figure 70 : Poutre de (100x100x400 mm) lors l'essai de flexion

4.2.6.4 Module d'élasticité E

Les résultats du module d'élasticité des bétons formulés avec les GR de type MR-2 et de diamètre (0-20 mm) totalement saturés à différents âges de 28, 56 et 91 jours sont présentés dans la figure 71. Chaque valeur est une moyenne obtenue sur deux cylindres de (100x200 mm). Le Tableau 35 résume tous les résultats obtenus sur les bétons étudiés. Comme pour les résistances, les mélanges avec des granulats recyclés présentent une chute du module d'élasticité E par rapport au mélange de référence avec 100% de granulats naturels. En effet l'utilisation de 20% de GR causé une réduction de 25% (de 44,2 à 33,5 GPa). L'incorporation des taux plus importants en GR de 35% à 50% une réduction de 26% et 28% respectivement.

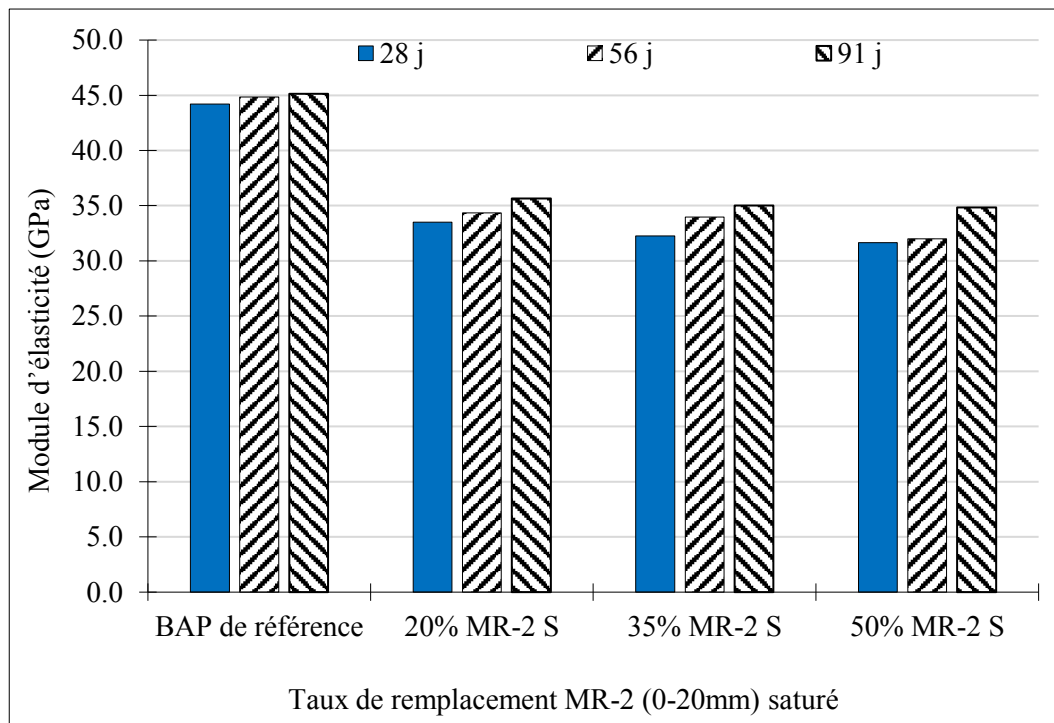


Figure 71 : Module d'élasticité E des bétons étudiés à 28,56 et 91 jours

Tableau 35 : Résultats du module E des bétons étudiés à 28, 56 et 91 jours

Module (E) en GPA				
Béton	Age (Jours)	Cylindre 1	Cylindre 2	Moyenne
0 % MR-2 S	28	43,6	44,8	44,2
	56	44,8	44,9	44,9
	91	45,0	45,3	45,1
20% MR-2 S	28	32,1	34,9	33,5
	56	33,5	35,2	34,4
	91	36,5	34,8	35,7
35% MR-2 S	28	32,8	31,8	32,3
	56	33,3	34,6	34,0
	91	35,1	34,9	35,0
50% MR-2 S	28	32,8	30,5	31,6
	56	33,2	30,8	32,0
	91	34,8	/	34,8

4.2.6.5 Fluage à la compression

Les résultats du fluage à 91 jours des BAP témoins à 100 % GN et des BAP 35% MR-2 saturés sont illustrés sur les figures 72 et 73. Les déformations par unité de contrainte [micromètre / (Mètre.MPa)] des deux mélanges étudiés sont résumées dans la figure 73.

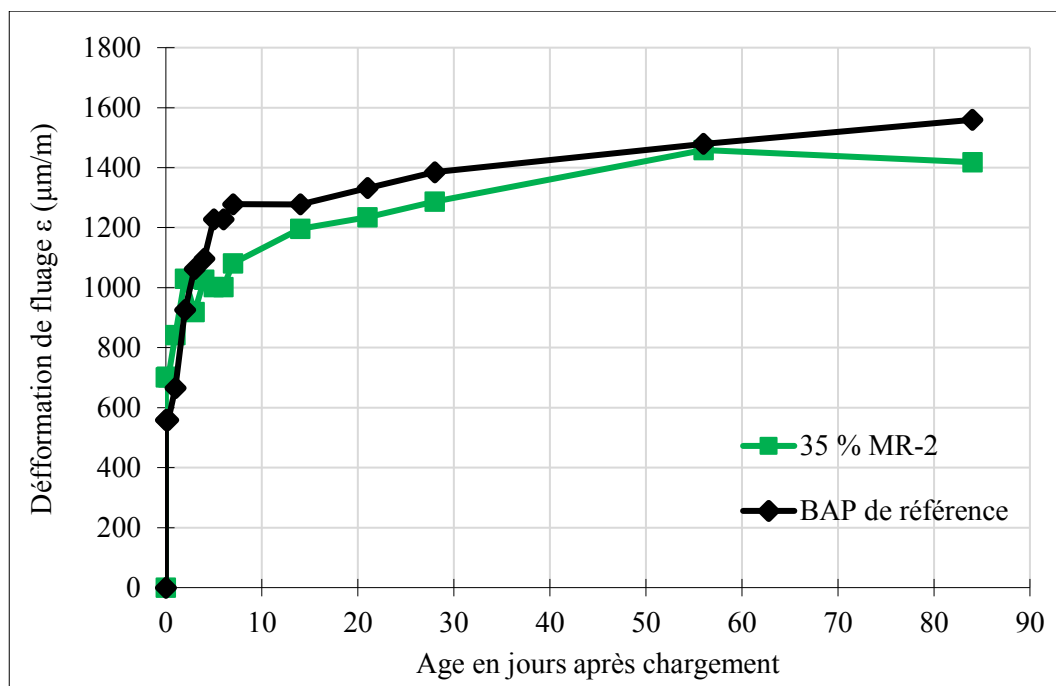


Figure 72 : Fluage de dessiccation ε ($\mu\text{m/m}$) en fonction de la durée de chargement – Chargement de 28 jours jusqu'à 91 jours pour deux bétons (100% GN et 35% MR-2 saturé)

La courbe $\varepsilon = \left(\frac{1}{E}\right) + F(K)\ln(t + 1)$ est donnée dans la figure 73 pour un chargement à 91 jours.

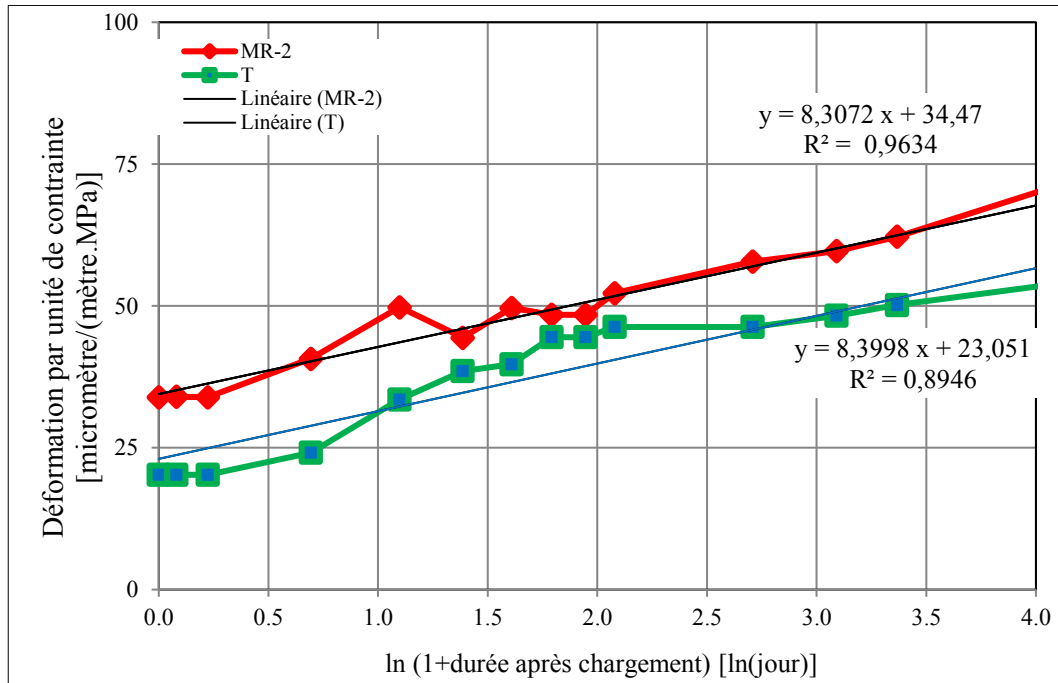


Figure 73 : $\varepsilon = \left(\frac{1}{E}\right) + F(K)\ln(t + 1)$ Chargement à 91 jours de BAP-T et BAP 35% MR-2 S

Taux de fluage et module élastique instantané :

Les valeurs du taux de fluage et du module élastique instantané obtenues par interpolation linéaire des courbes de la figure 73 sont données dans le tableau 36.

Tableau 36 : Module élastique instantané et taux de fluage à 91 jours

BAP	1/E	Module d'élasticité (E)	Taux de fluage, F(K)	Coefficient de régression linéaire - R²
Unité	GPa ⁻¹	GPa	-	-
Témoin	23,1	43,4	8,4	0,89
35% MR-S	34,5	29,0	8,3	0,96

D'après le tableau 36, le béton à 35 % MR-2 totalement saturé a un module élastique instantané inférieur au module élastique du béton témoin. Les deux bétons ont des taux de fluage comparables. La déformation des BAP à 35 % MR-2 (0-20 mm) saturés est moins élevée que celle des BAP de référence.

4.2.6.6 Qualité de l'adhérence de la réparation

Pour déterminer la qualité de l'adhérence de deux demi-cylindres collés, le cylindre bicouche est composé d'un vieux béton soumis à un essai de traction par fendage après 91 jours de mûrissement et un nouveau BAP collé sur place. Le cylindre bicouche soumis à un essai de compression et de traction par fendage. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 74. La résistivité électrique et la résistance à la compression sont proches à celles du béton sain. La rupture se situe dans la zone de transition entre les deux bétons (zone de faiblesse) (Figure 75).

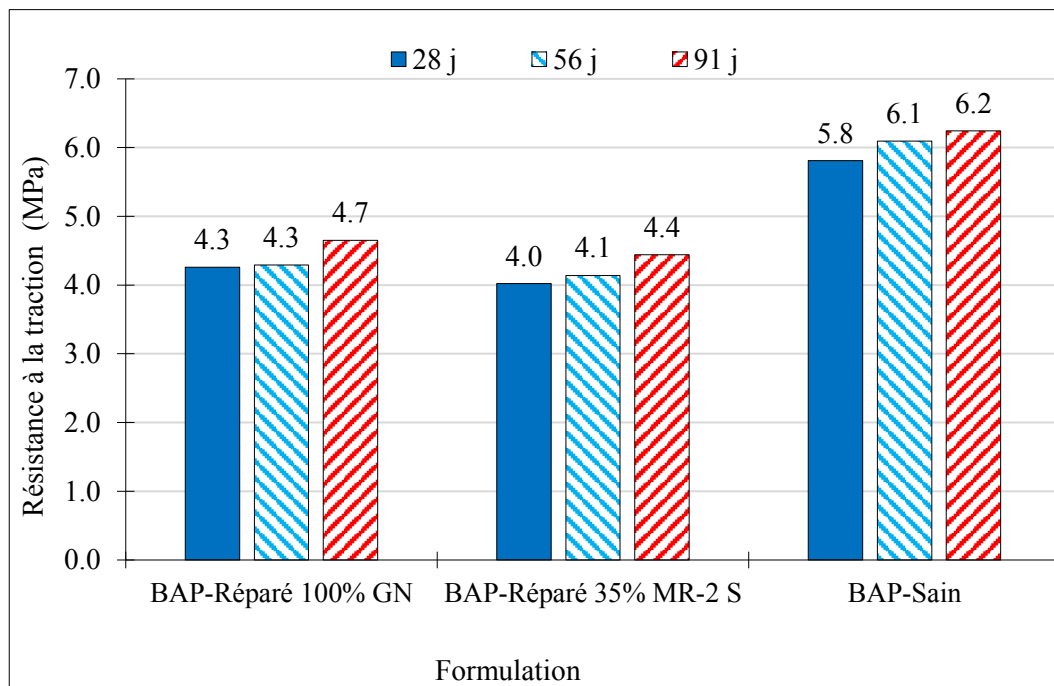


Figure 74 : Résistance à la traction des bétons réparés [témoin et 35 %MR-2 (0-20 mm)]

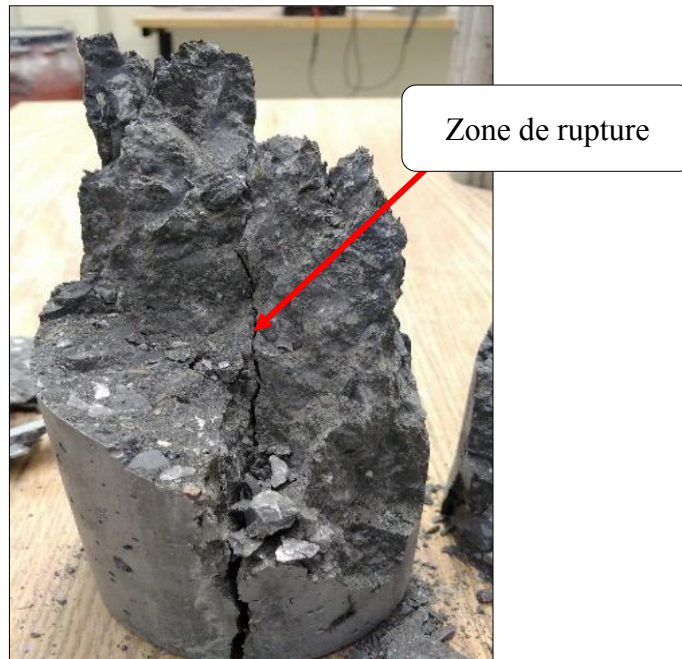


Figure 75 : Cylindre 100x200 mm après un essai de compression

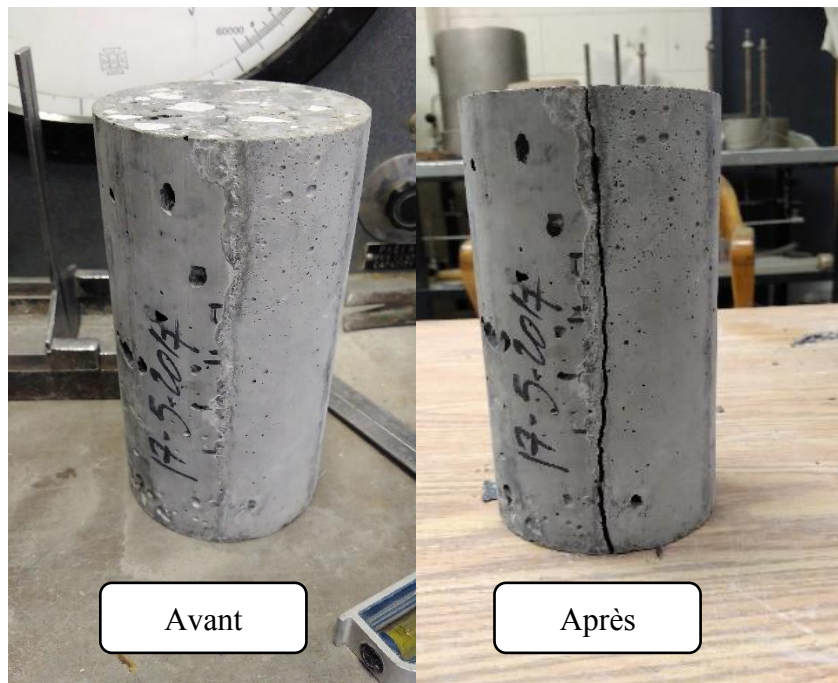


Figure 76 : Cylindre 100 x 200 mm avant et après un essai de traction par fendage

La Figure 76 montre un cylindre bicouche avant et après un essai de traction par fendage lors de la détermination de la qualité d'adhérence du béton réparé. On a observé que le béton est décollé au niveau de la zone de transition sous une contrainte de (4.5 MPa) à 91 jours pour les BAP à 35%

MR-2 et 4,7 MPa pour les BAP 0 % MR-2. Les valeurs des résistances à la traction des bétons réparés à 100% GN et à 35% MR-2 (0-20 mm) saturés sont plus proches. Une légère réduction pour des BAP-Réparé 35% MR-2 par rapport aux BAP-R 100% GN de 4,5%. Une différence de résistance de 25% entre le béton sain et le béton réparé est observée.

4.2.7 La durabilité

Les paramètres de la durabilité étudiés sont : la résistivité électrique, la perméabilité aux ions chlorure, la résistance aux cycles de gel-dégel, la résistance à l'écaillage, retrait endogène et le retrait de séchage.

4.2.7.1 Résistivité électrique

Les mesures des résistivités électriques ont été réalisées sur des échantillons de 100 x 200 mm à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours. Les résultats de résistivité sont illustrés dans le tableau 37. La résistivité électrique des bétons étudiés à l'âge de 28 jours est supérieure à (20 kΩ.cm), qui présente un béton résistant à la corrosion selon la norme ASTM C1220.

Tableau 37 : Résultats de la résistivité électrique en kΩ.cm à 3, 7, 14, 28, 56 et 91 jours des bétons étudiés « 0%, 20%, 35% et 50% MR-2 (0-20 mm) »

	Résistivité électrique en kΩ.cm					
Âge	3 j	7 j	14 j	28 j	56 j	91j
Témoin TerC ³	4,4	7,4	19,7	34,3	51,6	64,8
20% MR-2 S	4,0	5,2	14,7	30,0	51,4	59,9
35% MR-2 S	3,5	5,0	10,6	21,3	31,6	42,6
50% MR-2 S	2,5	4,3	10,4	17,4	29,6	38,5

La Figure 77 présente les résultats des résistivités électriques des bétons étudiés de la première phase de cette étude. Ces bétons sont évalués à des âges de 28, 56 et 91 jours de mûrissement. On constate que tous les mélanges présentent des niveaux de durabilité acceptable, ce qui se traduit par une plus forte résistance à la corrosion, sauf pour le béton de 50 % de GR saturés dont la résistivité électrique est de 17,4 kΩ.cm, soit légèrement inférieure à la limite correspondant à la faible perméabilité (20 kΩ.cm). D'après la classification de la norme ASTM C1760-12, une résistivité inférieure à (20 kΩ.cm) correspond à un risque de corrosion faible. À long terme (56 et

91 jours), la résistivité électrique de tous les bétons étudiés est supérieure à cette valeur critique (i.e 20 20 kΩ.cm).

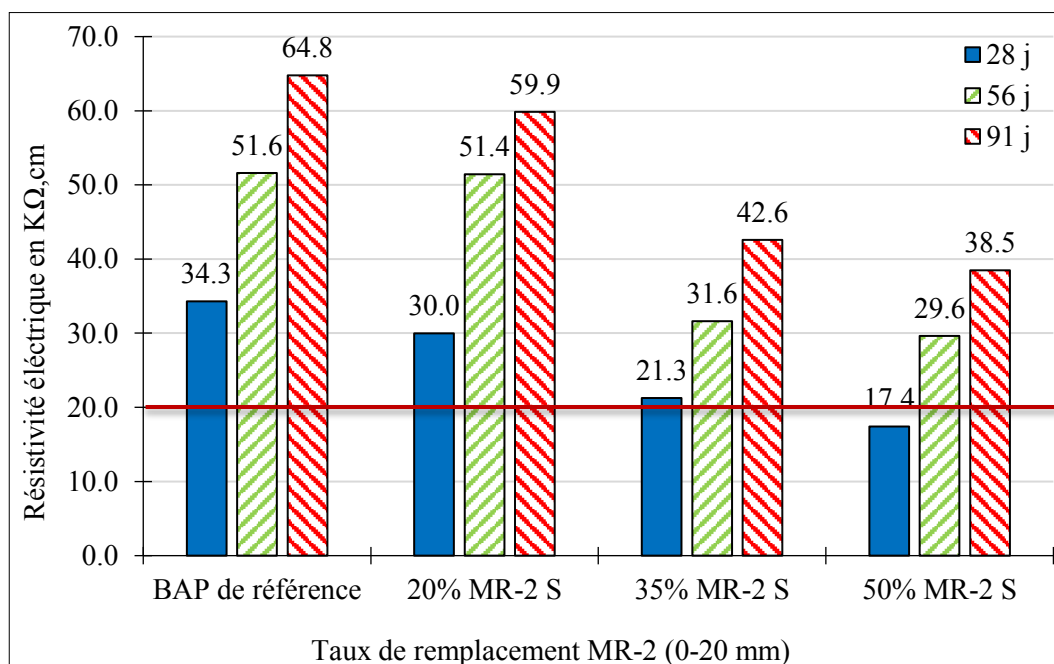


Figure 77 : Résistivité électrique des bétons étudiés à l'âge de 28, 56 et 91 jours

4.2.7.2 Résistance à la perméabilité aux ions de chlorure

Les résultats d'essai de perméabilité aux ions chlorures effectués sur des échantillons après 28, 56 et 91 jours de murissement sont présentés dans le tableau 38. La valeur moyenne est établie sur deux échantillons, pris en haut et bas d'un cylindre de 100 x 200 mm. Les résultats de la perméabilité aux ions de chlorure à 28, 56 et 91 jours sont présentés dans la figure 78. Ces essais sont réalisés selon la norme ASTM 1220.

Tableau 38 : Résultats de la perméabilité aux ions de chlorure à 28, 56 et 91 jours des bétons étudiés 0%, 20%, 35 % et 50%) MR-2 (0-20 mm)

Perméabilité aux ions de chlorure en Coulombs	Age (Jours)	Témoin	20 % MR-2	35 % MR-2	50 % MR-2
Haut	28	451	557	836	965
Bas		453	517	845	974
Moyenne		452	537	840,5	969,5
Haut	56	264	432	488	559
Bas		252	351	358	560
Moyenne		258	391,5	423	559,5
Haut	91	154	245	242	443
Bas		157	223	246	409
Moyenne		155,5	234	244	426

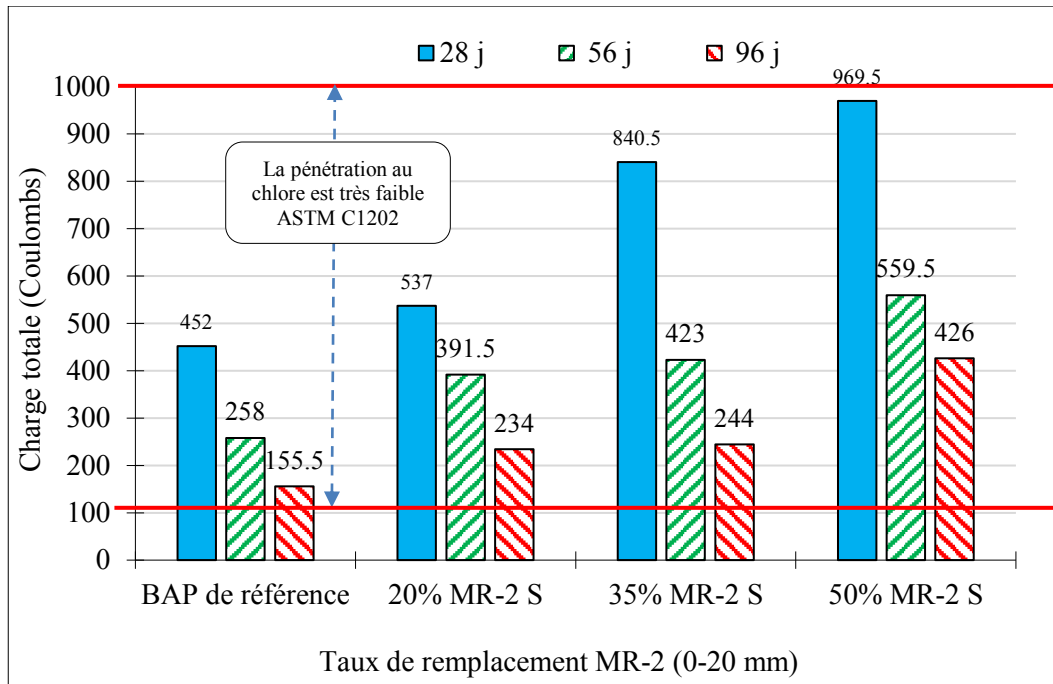


Figure 78 : Perméabilité aux ions chlorure des bétons étudiés

D'après la Figure 78, les résultats de la perméabilité aux ions de chlorure de tous les mélanges à 28 jours sont inférieurs à la charge totale de 1000 Coulombs, correspondant à la classe de perméabilité aux ions chlorures très faible selon la norme ASTM C1220, (Tableau 39). La seconde observation sur la perméabilité aux ions chlorure de tous les bétons étudiés indique qu'elle diminue avec l'âge (après 56 et 91 jours de mûrissement). Il y a une forte corrélation entre les résultats de la résistivité électrique et la perméabilité aux ions chlorures (Figure 79). Les BAP de référence donnent une meilleure imperméabilité que les autres bétons. Le béton avec un taux de remplacement élevé de 50 % de GR à 56 jours donne une bonne résistance aux ions chlorure, du point de vue de la durabilité. On observe que la perméabilité aux ions chlorures est directement proportionnelle à la teneur en GR. On constate une diminution de la perméabilité aux ions de chlorure avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés.

Tableau 39 : Classes de perméabilité des ions chlorure et résistivité électrique selon la norme ASTM C1220

La pénétration aux ions chlore	Perméabilité à 56 jours ASTM C1202 (coulombs)	Résistivité à 28 jours (K Ω .cm)
Haut	> 4000	< 5
Modéré	2000 - 4000	5 - 10
Faible	1000 - 2000	10 - 20
Très Faible	100 – 1000	20 - 200
Négligeable	< 100	> 200

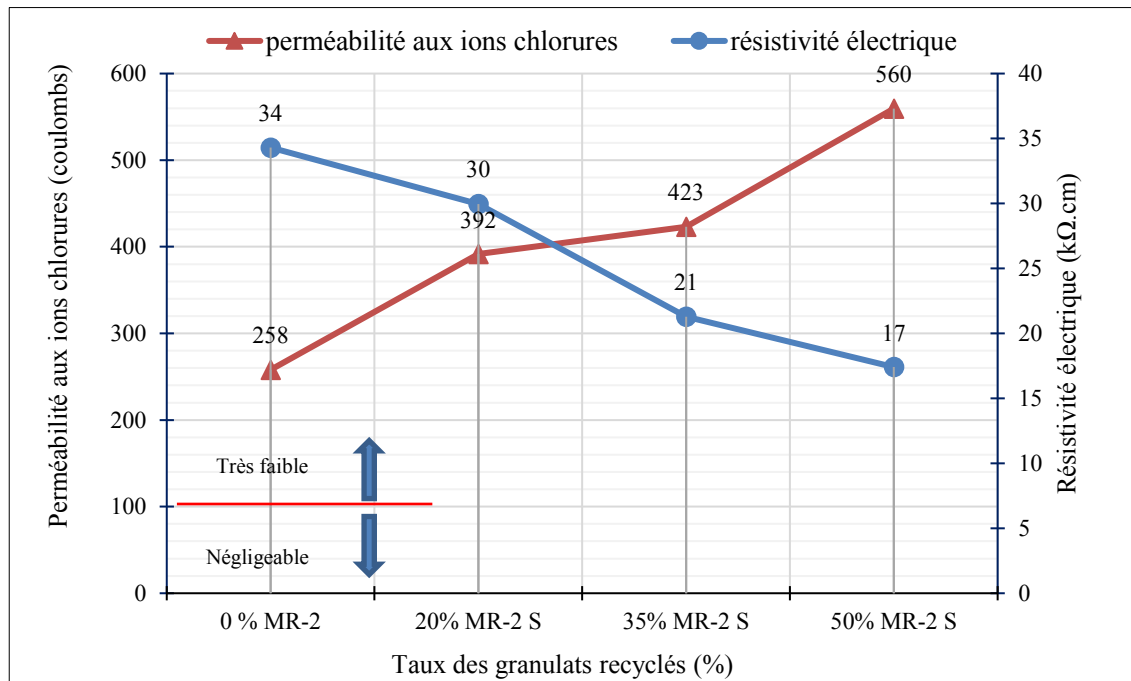


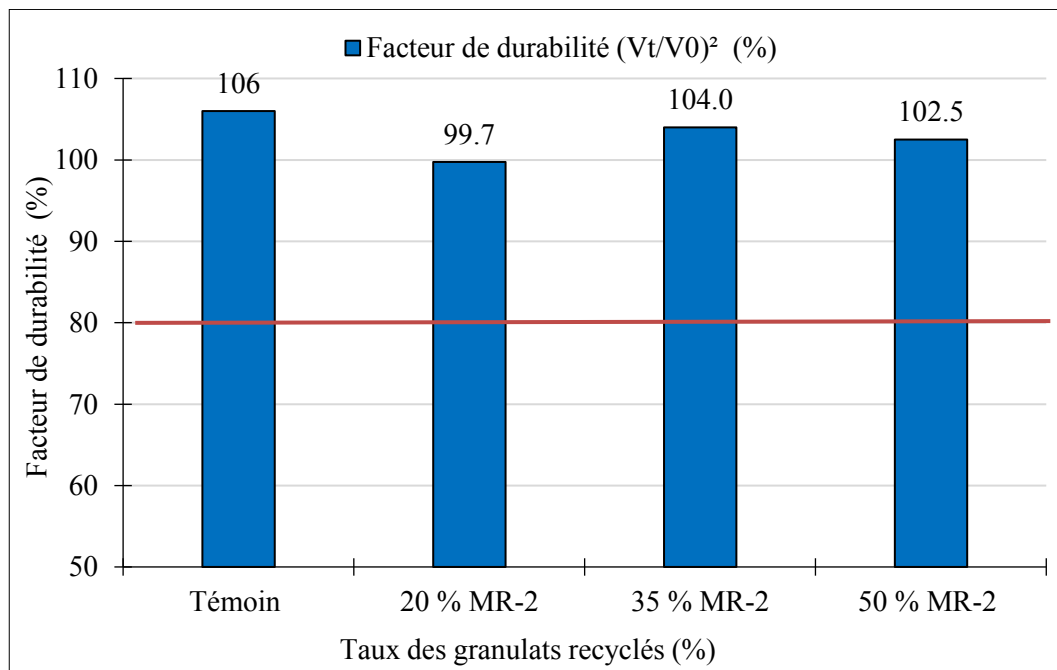
Figure 79 : La perméabilité aux ions chlorure à 56 jours et la résistivité à 28 jours en fonction du taux de remplacement des GR (0-20 mm)

4.2.7.3 Résistance au gel-dégel

Les résultats des essais de gel-dégel, réalisés conformément à la norme ASTM C-666A, sont présentés dans le tableau 40, où la variation de la masse et le facteur de durabilité en pourcentage (%), déformation en (μ m/m), après 300 cycles sont déterminés. Selon la norme ASTM C260, le béton est résistant au gel-dégel si le facteur de durabilité après 300 cycles de gel-dégel est supérieur à la limite de 80%.

Tableau 40 : Résultats des essais de gel-dégel des bétons étudiés

Mélanges (BAP)	Nombre de cycles	Variation de la masse (%)	Facteur de durabilité $(V_t/V_0)^2$ (%)	Déformation ($\mu\text{m/m}$)
Témoin	300	0,1	106,0	140
20 % MR-2 S		0,2	99,7	144
35 % MR-2 S		0,1	104,0	120
50 % MR-2 S		0,2	102,5	125

**Figure 80** : Facteur de durabilité $(V_t/V_0)^2$ (%) des bétons aux GR (0-20 mm) après 300 cycles de gel-dégel

On a observé que tous les mélanges fabriqués avec des granulats recyclés MR-2 (0-20 mm) présentent de bonnes résistances aux cycles de gel-dégel, avec un facteur de durabilité supérieur à 80% (Figure 80), et une très faible variation de la masse (inférieure à 0,2%) (Tableau 43). La résistance aux cycles de gel-dégel est liée principalement à la porosité capillaire, le réseau de bulles d'air, le degré de saturation et la porosité du granulat. Tous les mélanges étudiés ont une teneur en air entre 7 et 8%.

4.2.7.4 Résistance à l'écaillage

Les essais d'écaillage ont été réalisés conformément à la norme ASTM C672 sur deux différents mélanges : Un de BAP de référence 100% GN et un BAP de 35 % de MR-2 (0-20 mm). Les résultats sont la moyenne de deux éprouvettes de chaque béton étudié. La perte de la masse et l'évaluation visuelle d'écaillage s'est fait après 50 cycles et les résultats sont résumés dans le tableau 41. Selon une échelle comprise entre 0 à 6, représentant l'écaillage (Tableau 42), nous avons évalué les résultats des essais d'écaillage après 50 cycles.

Tableau 41 : Résultats des essais d'écaillage des bétons étudiés

Taux de remplacement	Nb.de cycles	0	5	10	15	25	50
0 % MR-2	Résidu et tamis	185,5	186,05	188,7	189,95	190,8	206,05
35 % MR-2		183,7	187,95	190,95	192,45	202,1	220,1
0 % MR-2	Résidu cumulatif (g)	0	0,55	3,2	4,45	5,3	20,55
35 % MR-2		0	4,25	7,25	8,75	18,40	36,40
0 % MR-2	Code	0	1	1	1	1	1
35 % MR-2		0	1	1	1	1	2
0 % MR-2	Résidu g/m ²	0	10,66	62,02	86,24	102,71	398,26
35 % MR-2		0	82,19	140,23	169,26	355,98	704,32
0 % MR-2	Masse	13191,0	13237,0	13240,5	13240,5	13248,5	13247,5
35 % MR-2		13601,5	13653,0	13653,0	13661,5	13660,5	13661,0

Tableau 42 : Échelle d'écaillage ASTM C672

Code	Évaluation visuelle :
0	Aucun écaillage
1	Très léger (3,2 mm. Max. aucun granulat)
2	Léger à modéré
3	Modéré (quelques granulats)
4	Modéré à sévère
5	Sévère (granulats sur toute la surface)

D'après le Tableau 41, les résultats enregistrés sur les bétons à 50 cycles montrent que le béton formulé avec 35% de granulats recyclés de type MR-2 a un écaillage léger (selon la classification de la note visuelle stipulée dans la norme ASTM C672). On a observé dans la figure 81 que l'endommagement est dans les granulats recyclés et les BAP témoins montrent un écaillage très léger, soit (1) selon l'évaluation visuelle (Tableau 45) et la surface de l'éprouvette n'est pas endommagée (Figure 82).

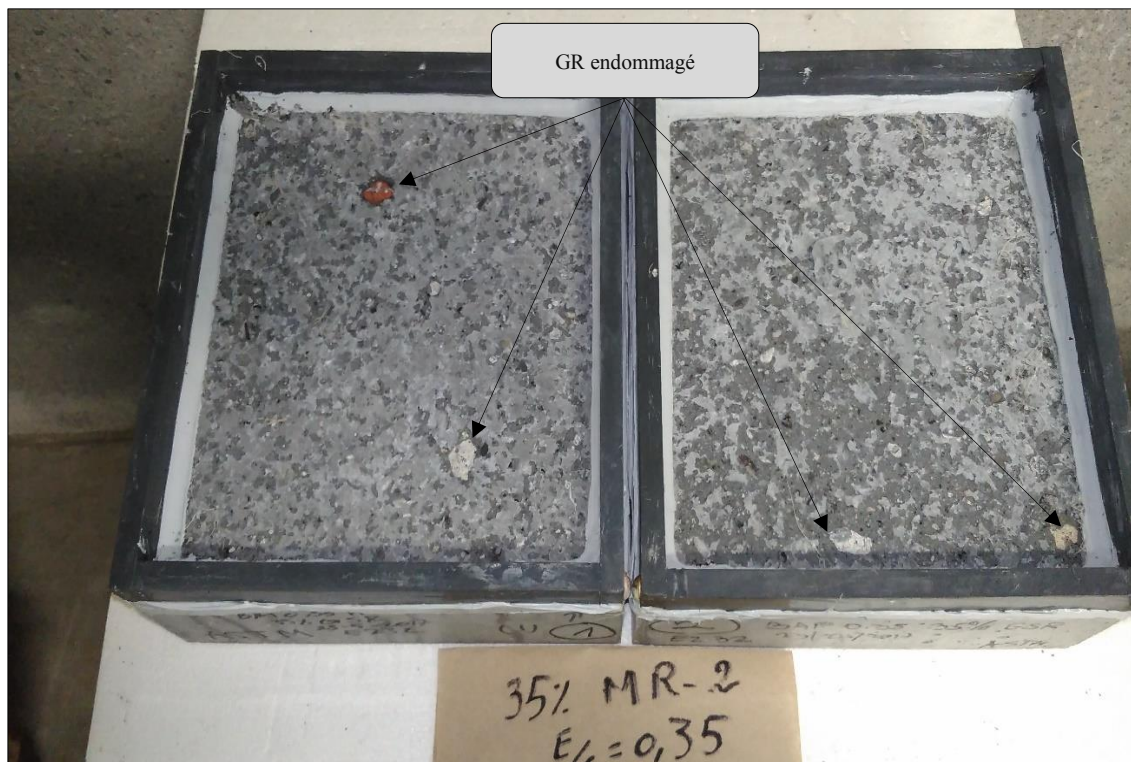


Figure 81 : Éprouvette de BAP contenant 35% MR-2 soumise à un essai d'écaillage

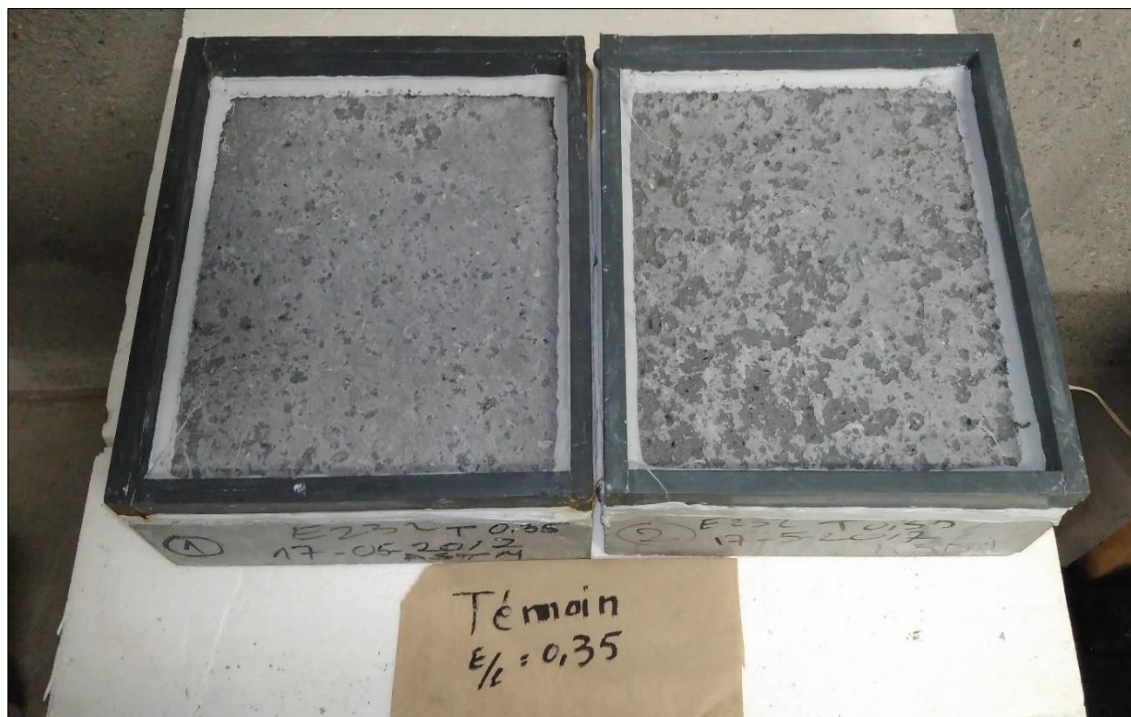


Figure 82 : Éprouvette de BAP témoin (0% GR) soumise à un essai d'écaillage

4.2.7.5 Retrait endogène

La mesure du retrait endogène est effectuée en suivant deux méthodes de mesure. La première méthode est réalisée en utilisant la même méthode de retrait de séchage (avec les plots installés sur les deux extrémités de la poutre emballée avec un film d'aluminium autocollant). Cette méthode est appliquée sur deux mélanges, 100% GN et 35% MR-2 saturé. La deuxième méthode est utilisée pour mesurer le retrait endogène avec une corde vibrante installée dans la poutre. Cette méthode est appliquée sur le mélange de 35 % MR-2 saturé, afin de comparer les deux méthodes.

1) Retrait endogène sans corde vibrante (avec les plots) :

La Figure 83 présente le comportement vis-à-vis du retrait endogène des bétons étudiés avec TerC³ en fonction du temps pour une période allant jusqu'à 56 jours, en utilisant la première méthode. La Figure 84 présente l'écart de retrait endogène des BAP contenant des granulats recyclés par rapport aux BAP témoin 100% GN.

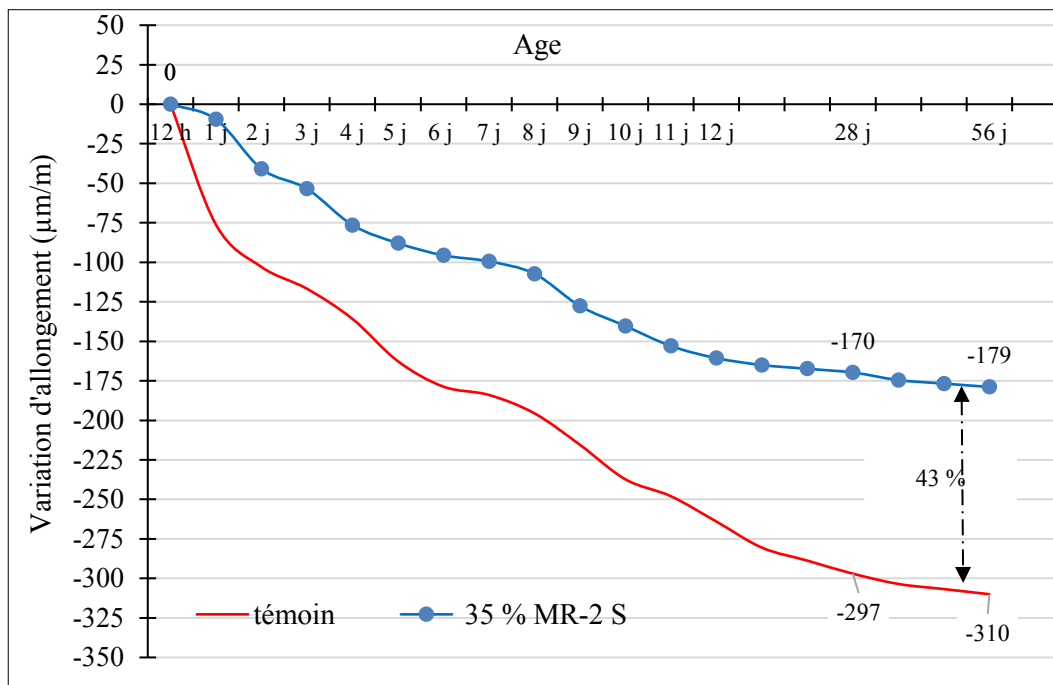


Figure 83 : Résultats du retrait endogène des bétons étudiés (BAP de référence et des BAP 35% MR-2 saturé)

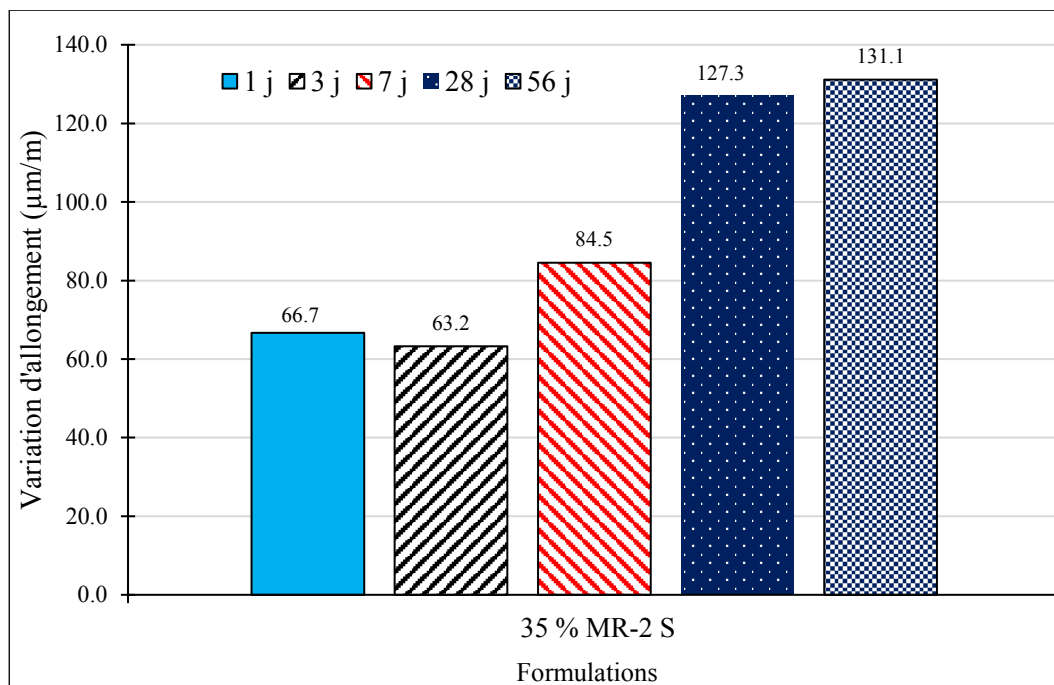


Figure 84 : Écart du retrait endogène des BAP 35% MR-2 par rapport aux BAP témoin

Les résultats expérimentaux permettent de conclure que les bétons qui contiennent des granulats recyclés saturés présentent une réduction de l'ordre de 42,3% du retrait endogène par rapport au retrait endogène des bétons sans granulats recyclés (100% GN). La variation d'allongement des BAP aux GR saturés est moins que les BAP aux GN. Par ailleurs, il est observé que l'écart entre les retrait endogènes des bétons aux granulats recyclés saturés et du béton de référence aux granulats naturels augmente en fonction l'âge. Les BAP 35% MR-2 saturés présentent un retrait endogène plus faible.

2) Retrait endogène avec corde vibrante :

La Figure 85 présente le comportement, vis-à-vis du retrait endogène, des BAP 35%MR-2 saturés et fabriqués avec le liant ternaire TerC³ en fonction du temps pour une période allant jusqu'à 28 jours. La corde vibrante est utilisée pour le retrait endogène d'un seul mélange, soit le BAP 35% MR-2 (0-20 mm) saturé, dans le but de le comparer aux retrait obtenus avec l'autre méthode de mesure.

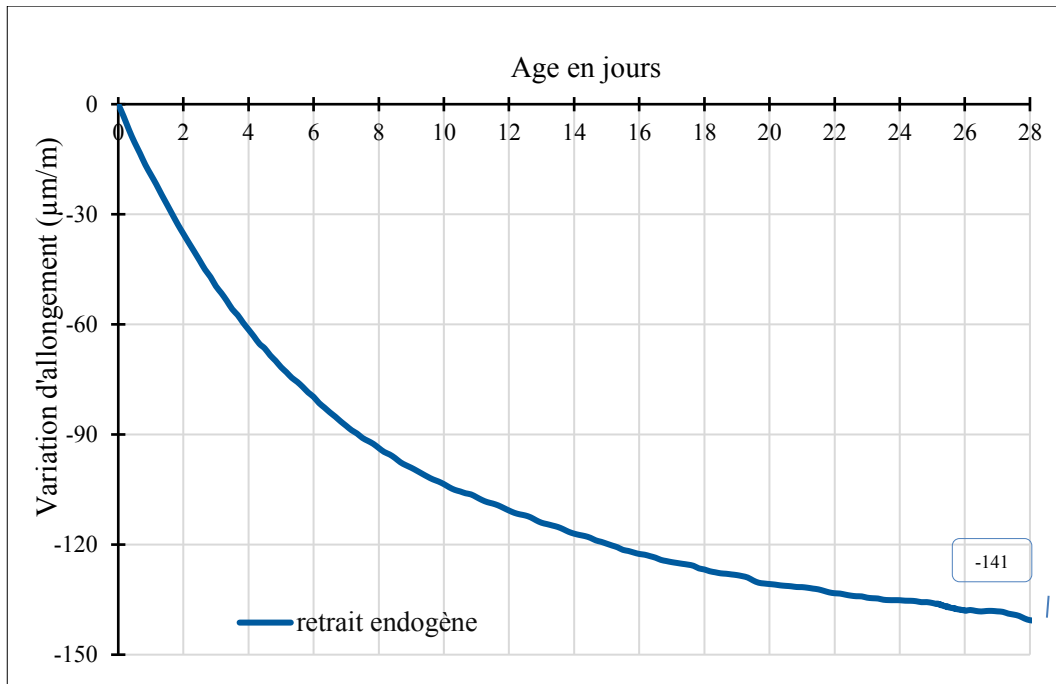


Figure 85 : Retrait endogène des BAP 35% MR-2 saturés en utilisant la corde vibrante

4.2.7.6 Retrait de séchage

L'essai de retrait de séchage est effectué sur deux mélanges, soit le BAP de référence 100% GN et les BAP aux GR 35% MR-2 (0-20 mm) saturé. La Figure 86 montre les résultats des retraits de séchage des bétons fabriqués avec un liant ternaire du type TerC³ en fonction du temps et des retraits de séchage pour une période allant jusqu'à 91 jours. Pour les mêmes conditions de cure, 28 jours de mûrissement à l'eau. Par la suite, les éprouvettes sont exposées à l'air à une température de 22 °C et une humidité relative de $50 \pm 4\%$.

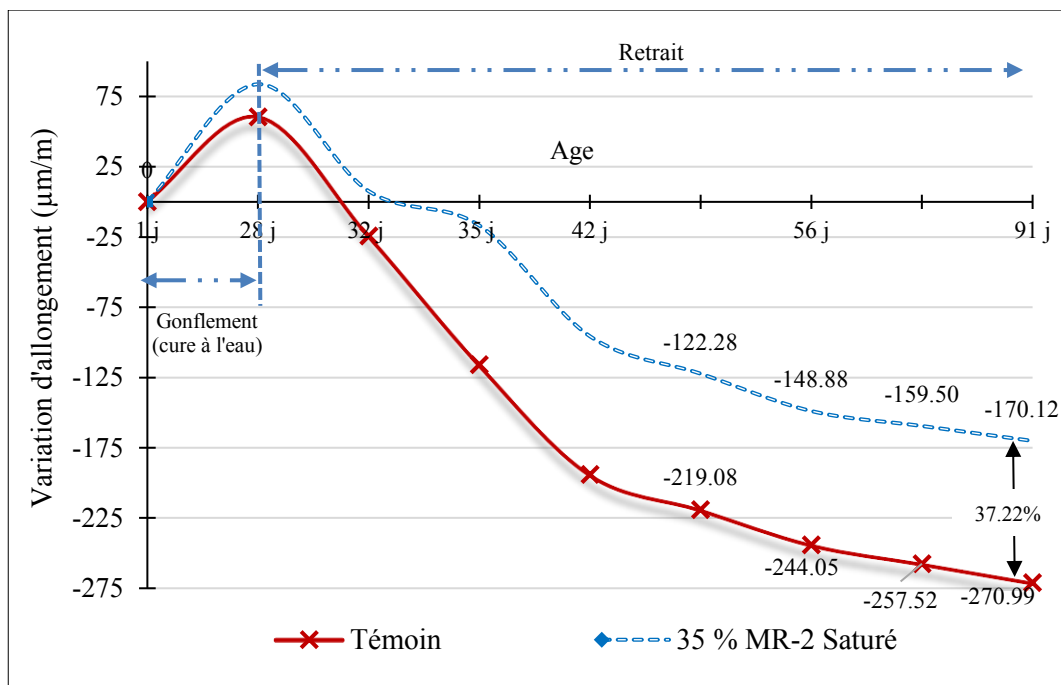


Figure 86 : Retraits de séchage des bétons étudiés (BAP – T, BAP 35% MR-2 (0-20 mm) en fonction du temps, cure à une humidité relative de $50 \pm 4\%$

On observe un gonflement similaire des deux mélanges pendant la période de cure à l'eau. Le gonflement des BAP aux GN est moins important à celui des BAP aux GR. Le retrait de séchage des BAP 35% MR-2-S (0-20 mm) est moins élevé par rapport au BAP de référence. À l'âge de 91 jours, le retrait de séchage des BAP aux GN est de $(-271 \mu\text{m/m})$. Cette valeur est supérieure à celle obtenue avec le BAP 35 % MR-2-S $(-170,12 \mu\text{m/m})$. Une réduction du retrait de l'ordre de $(37,2\%)$ par rapport au béton de référence est obtenue.

4.2.7.7 Retrait total

Le retrait total est la somme des deux retraits, soit le retrait de séchage, après 28 jours de cure et le retrait endogène, après 24 heures de contact eau-ciment, pour une période allant jusqu'à 56 jours. La Figure 87 présente le retrait total des bétons autoplaçants étudiés, soit le BAP de référence (100% GN), les BAP contenant des granulats recyclés saturés 35% MR-2 (0-20 mm).

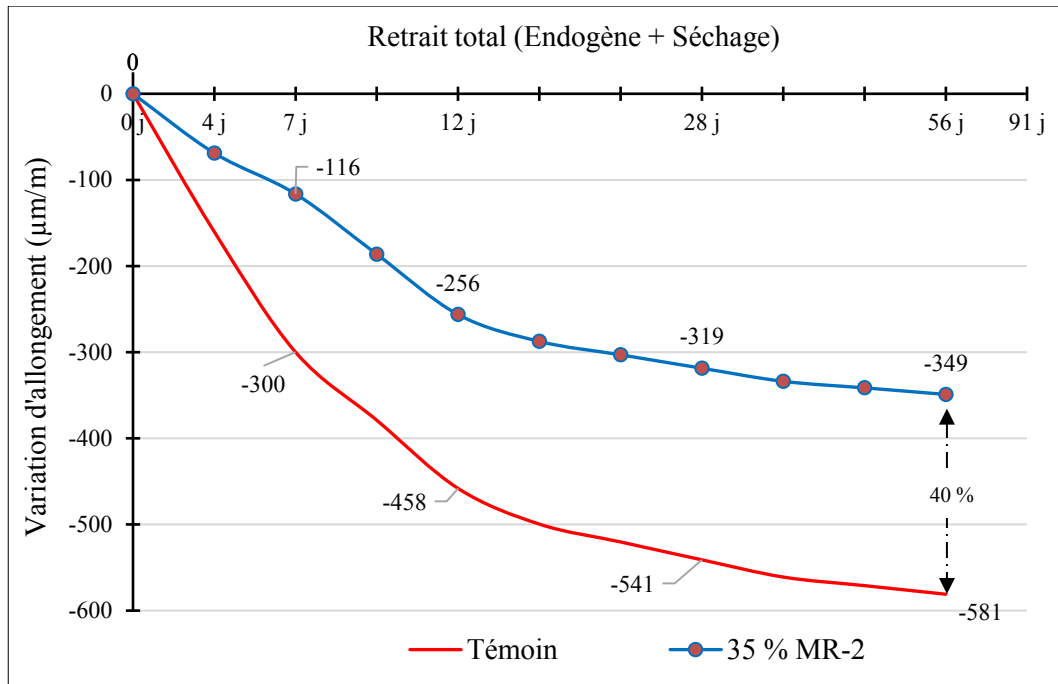


Figure 87 : Résultat du retrait total des bétons étudiés

4.3 Phase III - Effet de l'état de saturation des GR et du type de liant sur l'ouvrabilité, propriétés mécaniques et durabilité

Dans le cadre de la troisième phase, nous présentons les résultats des bétons étudiés avec le même taux de remplacement et différent état de saturation. Une étude paramétrique sur un béton autoplaçant (BAP) fabriqué avec différent état de saturation et type de liant.

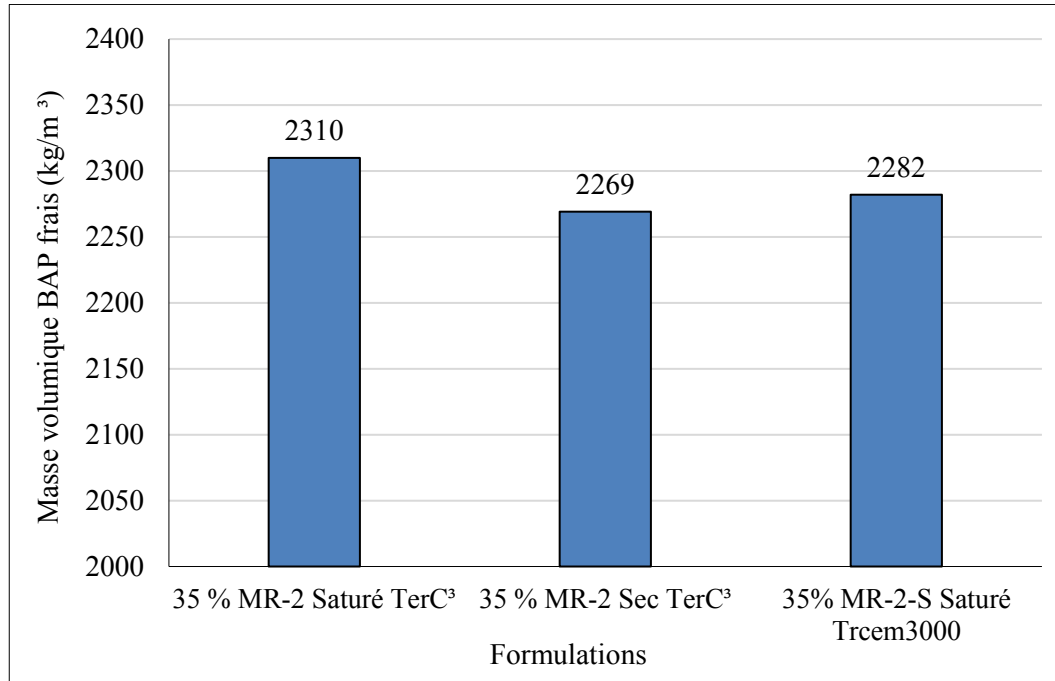
4.3.1 Résultats à l'état frais

4.3.1.1 Masse volumique

La Figure 88 présente les masses volumiques des trois bétons étudiés. On observe que pour le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés de 35% (0-20 mm), et le même type de liant (TerC³), la masse volumique des BAP aux GR secs à l'état frais est inférieure de l'ordre de 1,8% à celle des BAP aux GR saturés. Cette différence est due probablement à la présence d'eau dans les pores des granulats recyclés saturés. La masse volumique du BAP aux GR élaboré avec un liant ternaire de type Tercem3000 est légèrement inférieure à celle du BAP aux GR élaboré avec un liant du type TerC³. Le Tableau 43 présente les teneurs en air et les masses volumiques des bétons étudiés dans cette phase pour le même taux de remplacement 35% de MR-2 (0-20 mm).

Tableau 43 : Masses volumiques et teneurs en air des BAP (35% MR-2 sec, 35% MR-2 saturé) avec TerC³ et 35% MR-2 Tercem3000

Type de BAP	Air (%)	Masse volumique BAP frais (kg/m ³)
35% MR-2-S	7,8	2310
35 % MR-2-NS	7,1	2269
35 % MR-2-S -Tercem3000	7,9	2282

**Figure 88 :** Masses volumiques des bétons frais, BAP (35% de MR-2 sec, 35% de MR-2 saturé) avec TerC³ et 35% de MR-2 avec le Tercem3000

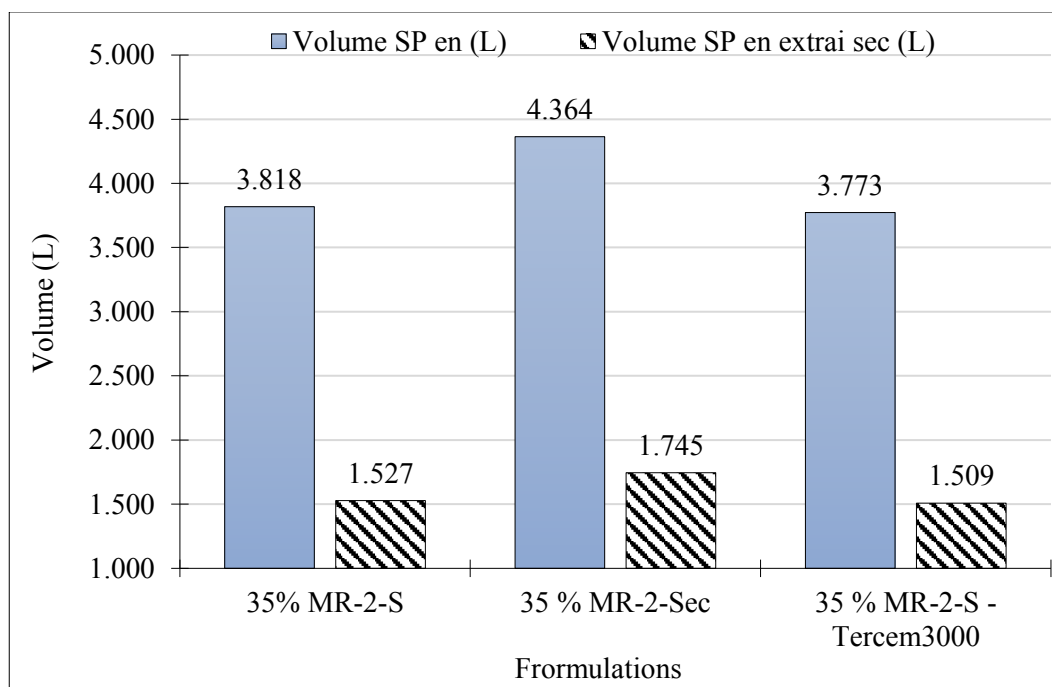
4.3.1.1.1 Teneur en superplastifiant

La demande en SP est très élevée pour les bétons à faible rapport E/L et haute performance. L'utilisation des GR dans le béton autoplaçant affecte l'ouvrabilité et la rhéologie, causée par le mortier résiduel qui a une forte absorption et qui est variable dépendamment de la qualité de l'ancien béton. Durant le malaxage, le béton fabriqué avec de granulats recyclés absorbe l'eau de gâchage et le SP dilué dans l'eau de gâchage, ce qui peut avoir une influence sur la maniabilité. L'ajout du SP s'avère nécessaire pour l'étalement attendu.

Tableau 44 : Teneur en superplastifiant utilisé dans les mélanges étudiés

	Teneur en SP					
	110 L béton			1 m ³ béton		
	Volume SP en (L)	Volume SP en extrait sec (L)	Masse SP extrait sec (kg)	Volume SP en (L)	Volume SP en extrait sec (L)	Masse SP en extrait sec (kg)
35% MR-2-S TerC ³	0,420	0,168	0,181	3,818	1,527	1,649
35 % MR-2-NS TerC ³	0,480	0,192	0,207	4,364	1,745	1,885
35 % MR-2-S - Tercem3000	0,415	0,166	0,179	3,773	1,509	1,630

La Figure 89 présente les résultats des teneurs en SP, en extrait sec, utilisés dans les bétons étudiés en volume pour de béton 1 m³.

**Figure 89** : Teneur en SP pour les bétons étudiés

On observe que la demande en SP des BAP aux GR secs est supérieure à celle des BAP aux GR saturés. La demande en SP des BAP aux GR saturés fabriqués avec un liant ternaire Tercem300 est légèrement inférieure à celle des BAP aux GR saturés fabriqués avec le liant ternaire TerC³.

4.3.1.1.2 Étalement / J-Ring

La Figure 90 présente les résultats de l'étalement et du J-ring des trois bétons étudiés. Le BAP contenant 35% de MR-2 (0-20 mm) saturé respecte la condition (étalement – J-ring < 50 mm). Par ailleurs, dans le cas du BAP aux GR à l'état sec on observe une perte de maniabilité, ce béton ne respecte pas la condition de la norme ASTM C 1611 et ACI 237 (étalement – J-ring < 50 mm) (Tableau 45).

Le Tableau 45 résume les résultats de T_{50} , étalement et J-ring des trois BAP étudiés, soient le BAP 35% MR-2 (0-20 mm) saturé fabriqué avec le liant TerC³, le BAP 35% de MR-2 (0-20 mm) sec fabriqué avec le liant TerC³ et le BAP 35% de MR-2 (0-20 mm) saturé fabriqué avec le liant Tercem3000.

Tableau 45 : Résultats des étalements, T_{50} et J-ring des bétons étudiés

BAP	T_{50} (s)	Étalement (mm)	J-Ring (mm)	Étalement - J-Ring < 50 mm (mm)
35% MR-2-Saturé	3,10	715	670	45
35 % MR-2- sec	4,62	655	585	70
35 % MR-2-S Tercem3000	4,28	615	555	60

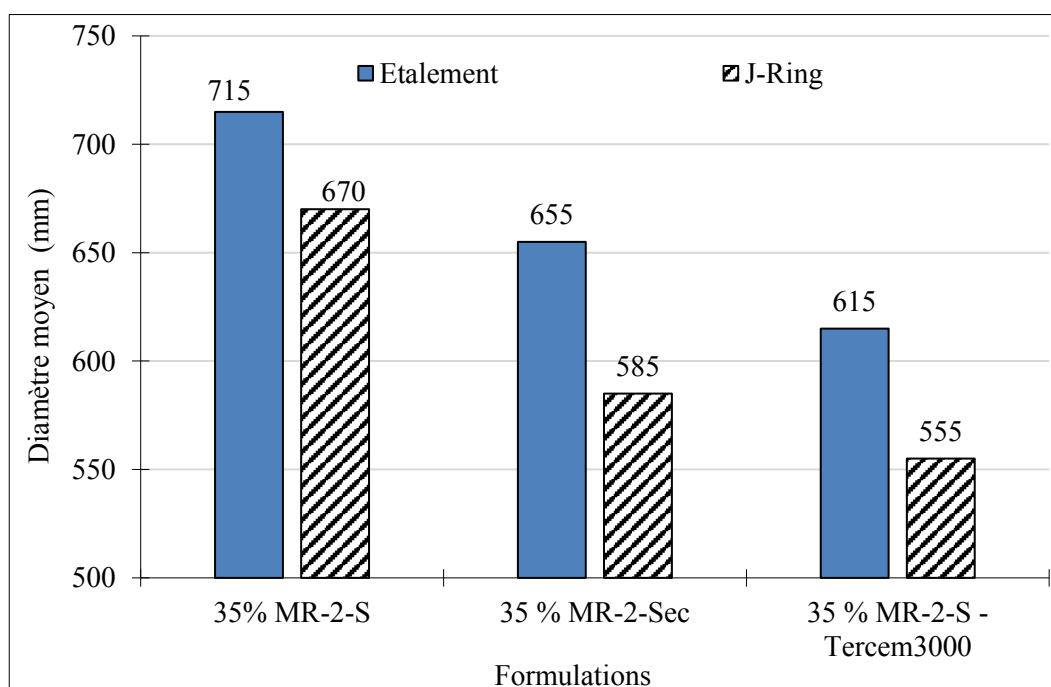


Figure 90 : Etalement comparés par J-Ring des bétons étudiés

4.3.2 Propriétés mécaniques

4.3.2.1 Résistance à la compression

Les résistances à la compression déterminées à 28, 56 et 91 jours des bétons étudiés sont présentées dans la figure 91. Les résistances à la compression du BAP aux GR saturé fabriqué avec le liant ternaire TerC³ sont inférieures à celles des BAP aux GR secs fabriqués avec le même type de liant et des BAP aux GR saturés fabriqués avec le liant ternaire Tercem3000. On observe que tous les mélanges donnent des résistances à 56 jours supérieures à 50 MPa.

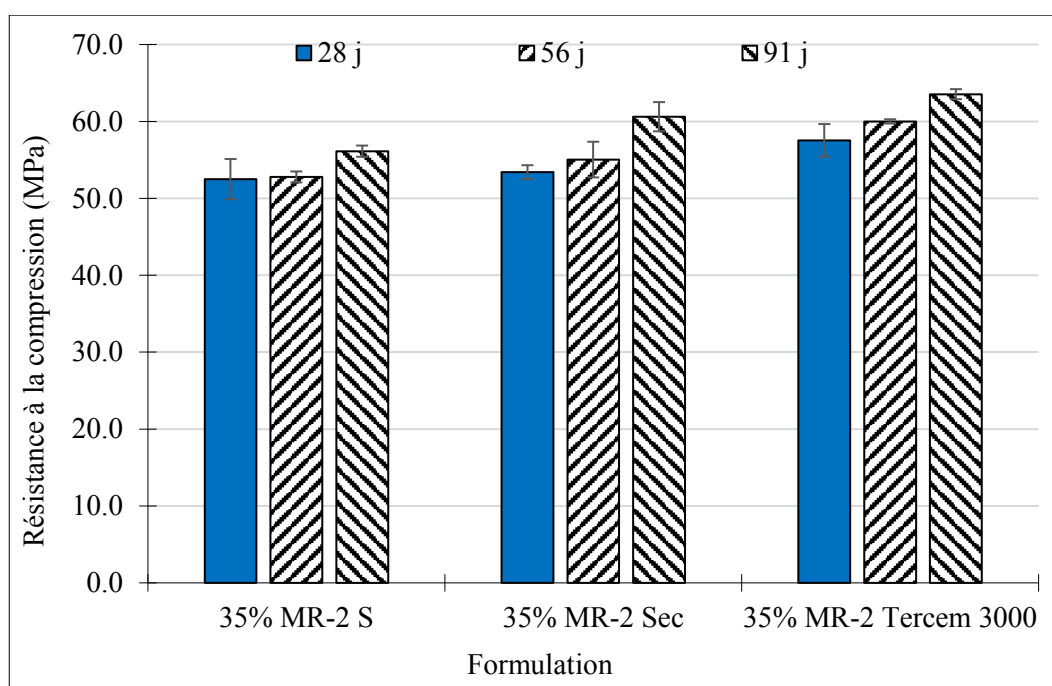


Figure 91 : Gain de résistances à la compression des bétons étudiés

4.3.2.2 Résistance à la traction

Les résultats de la résistance à la traction par fendage sont présentés dans la figure 92. Les bétons étudiés ont le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés, mais différents états de saturation des GR. Par contre, ils sont formulés avec un même type de liant. On observe que pour le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés et pour le même type de liant, la résistance à la traction des BAP aux GR secs est supérieure à celle des BAP avec des GR saturés. Par ailleurs, pour le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés et pour le même état de saturation des GR, la résistance à la

traction des BAP élaborés avec le liant Tercem3000 est supérieure à celle des BAP fabriqués avec le liant TerC³.

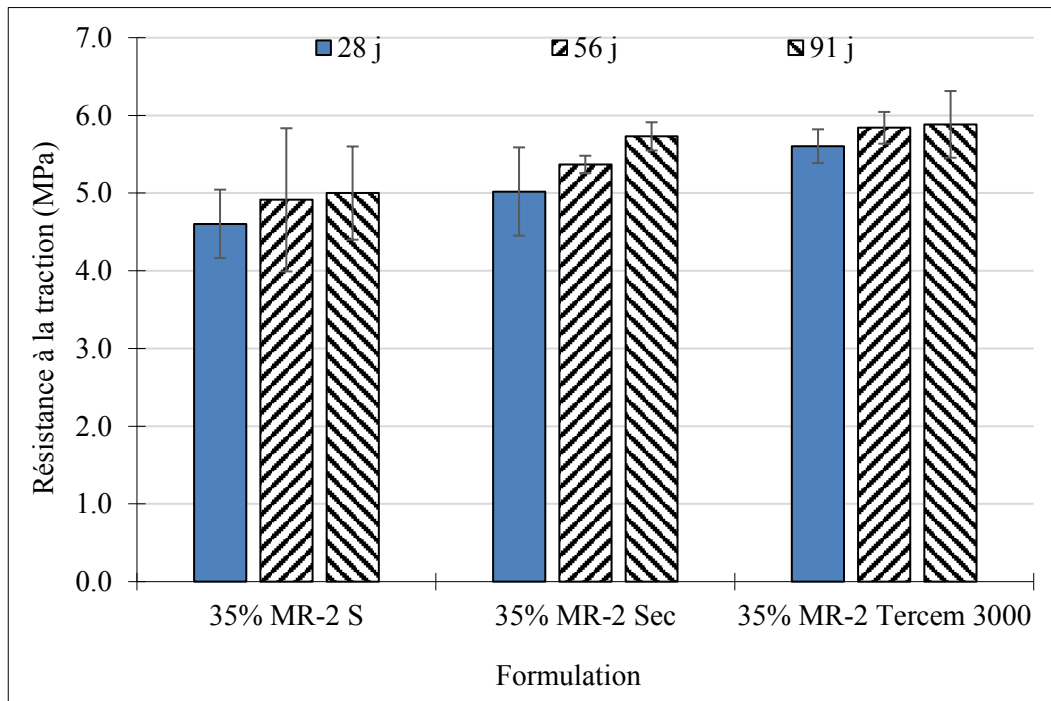


Figure 92 : Gain de résistances à la traction par fendage des bétons étudiés

4.3.2.3 Résistance en flexion

Les résultats de la résistance en flexion des bétons étudiés sont présentés dans la figure 93. On observe que pour le même taux de remplacement de MR-2 (0-20 mm), les résistances à la flexion à 28 jours sont de 5,7 MPa pour les BAP aux GR saturés et de 6,5 MPa pour les BAP aux GR secs. En utilisant un liant ternaire TerC³. Par ailleurs, dans le cas des BAP formulés avec le liant Tercem3000, une résistance à la flexion de 70 MPa à 28 jours est obtenue. La tendance est moins évidente pour l'essai de résistance à la traction entre le mélange utilisant le liant TerC³ avec des GR secs et le mélange incorporation des GR saturés et le liant Tercem3000.

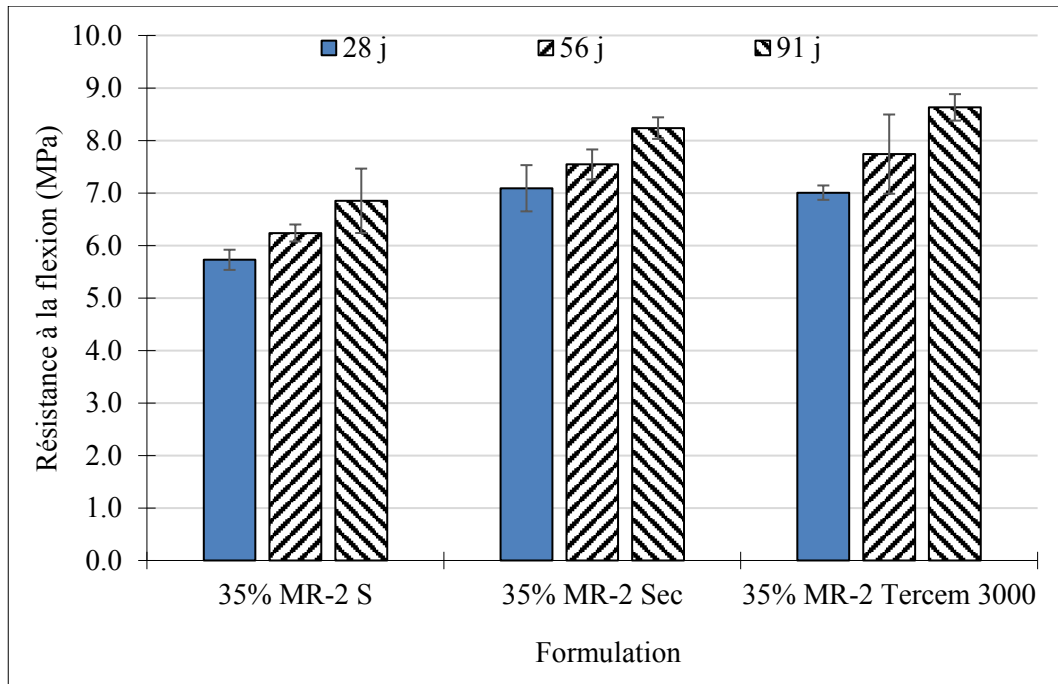


Figure 93 : Gain de résistances en flexion des bétons étudiés

4.3.2.4 Module d'élasticité

Tous les mélanges étudiés sont formulés avec le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés de (35%).

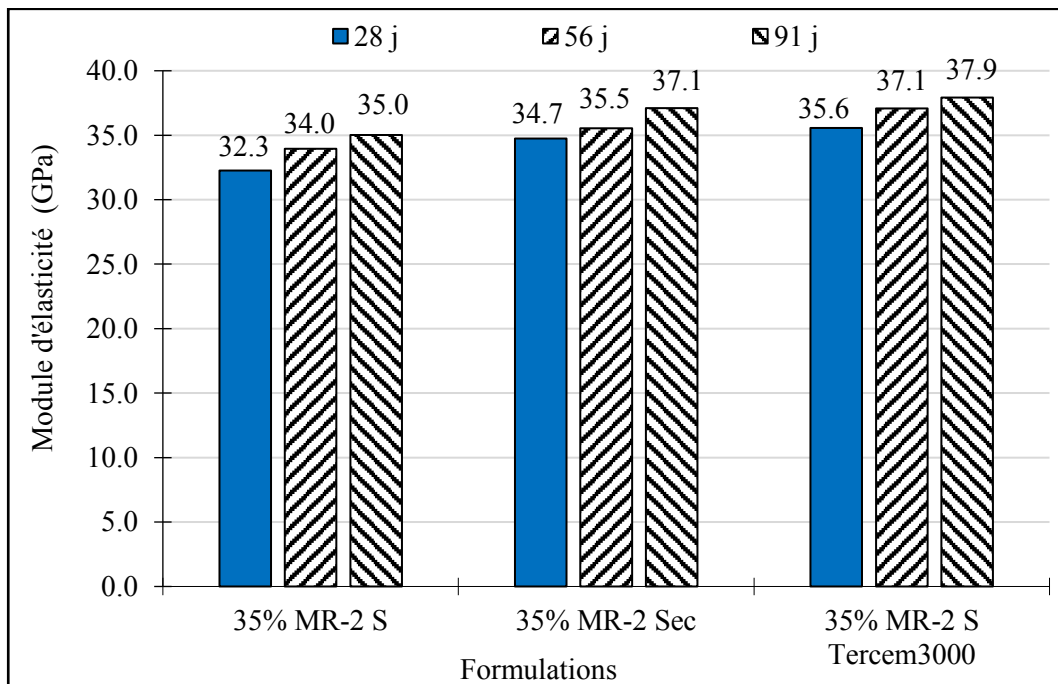


Figure 94 : Module d'élasticité à différents âges des bétons étudiés

Pour même type de liant TerC^3 , les bétons formulés avec les GR non saturés donnent des valeurs légèrement supérieures aux bétons formulés avec des GR saturés. Par ailleurs, on observe que les bétons formulés avec un liant Tercem3000 et des GR saturé ont un module supérieur à celui des bétons fabriqués avec un liant TerC^3 et des GR secs. La Figure 94 présente les résultats des modules d'élasticité des mélanges étudiés.

4.3.3 Durabilité

4.3.3.1 Résistivité électrique

La Figure 95 présente les résultats de la résistivité électrique des mélanges étudiés dans cette phase. On observe que tous les mélanges donnent une résistance de la résistivité électrique supérieure à 20 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ à 28 jours, ce qui correspond à une perméabilité aux ions chlore très faible selon la norme ASTM C1202. La deuxième observation est que l'évolution de résistivité électrique des BAP aux GR formulés avec le liant TerC^3 à long terme (56 et 91 jours) est supérieure à celle des BAP avec un liant Tercem3000.

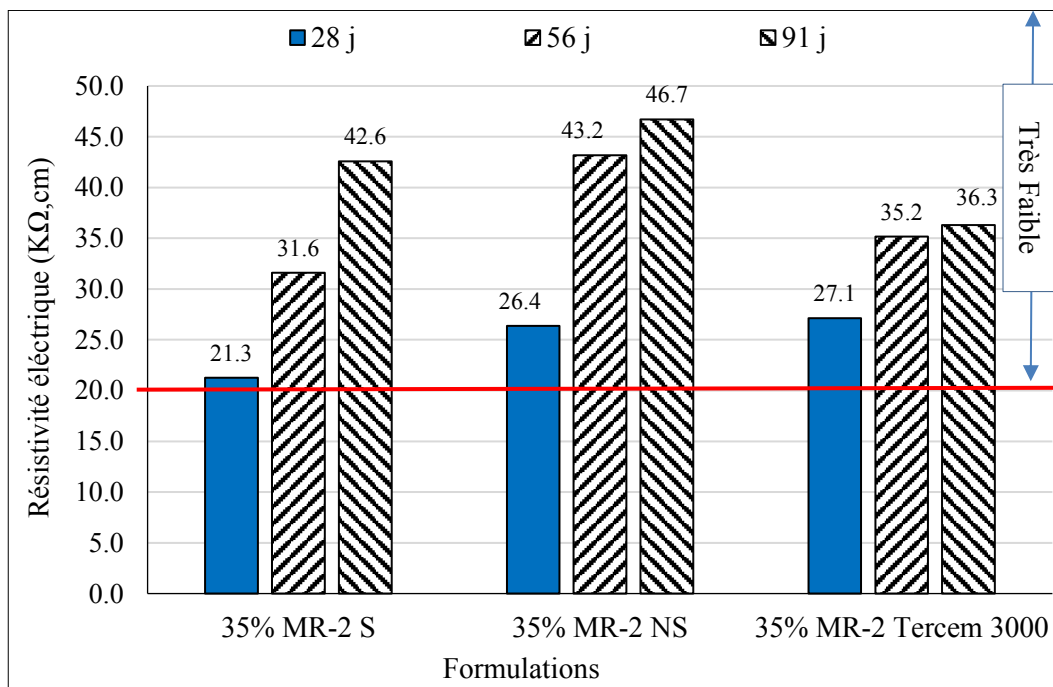


Figure 95 : Résistivité électrique des bétons étudiés

4.3.3.2 Perméabilité aux ions de chlorure

La Figure 96 présente les résultats de la perméabilité aux ions de chlorure des mélanges étudiés dans cette phase. On observe que tous les mélanges donnent des résistances à la perméabilité aux

ions de chlorure supérieures à 100 Coulombs à 56 jours, correspondant à une perméabilité aux ions chlorure très faible selon la norme ASTM C1202-10. À un âge de 28 jours, les mélanges formulés avec un liant TerC³ présentent des résistances à la perméabilité aux ions de chlorure moins élevées par rapport aux bétons confectionnés avec un liant Tercem3000. À long terme (91 jours), ces mélanges donnent des résistances de l'ordre de 244 à 266 Coulombs, valeurs supérieures à celles des BAP contenant le liant Tercem3000 (402 Coulombs).

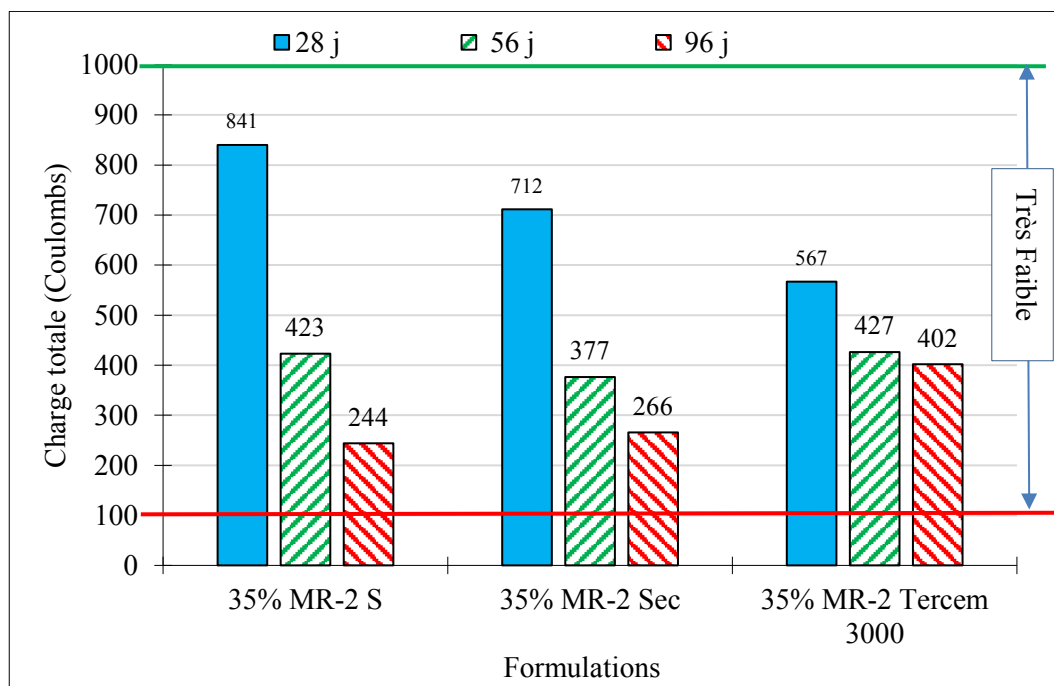


Figure 96 : Perméabilité aux ions de chlorure à différents âges des bétons étudiés

4.3.3.3 Résistance aux cycles de gel-dégel

La Figure 97 présente les résultats des résistances aux cycles de gel-dégel des bétons étudiés.

Les facteurs de durabilité obtenus après 300 cycles de gel/dégel sont de 104 et 100 pour les mélanges préparés avec le liant TerC³ et un taux de remplacement de 35% de granulats recyclés saturés et secs respectivement. Tous les essais s'ont été arrêtés après 300 cycles. Il est observé que les facteurs de durabilité obtenus ne sont pas affectés par l'état de saturation des granulats recyclés.

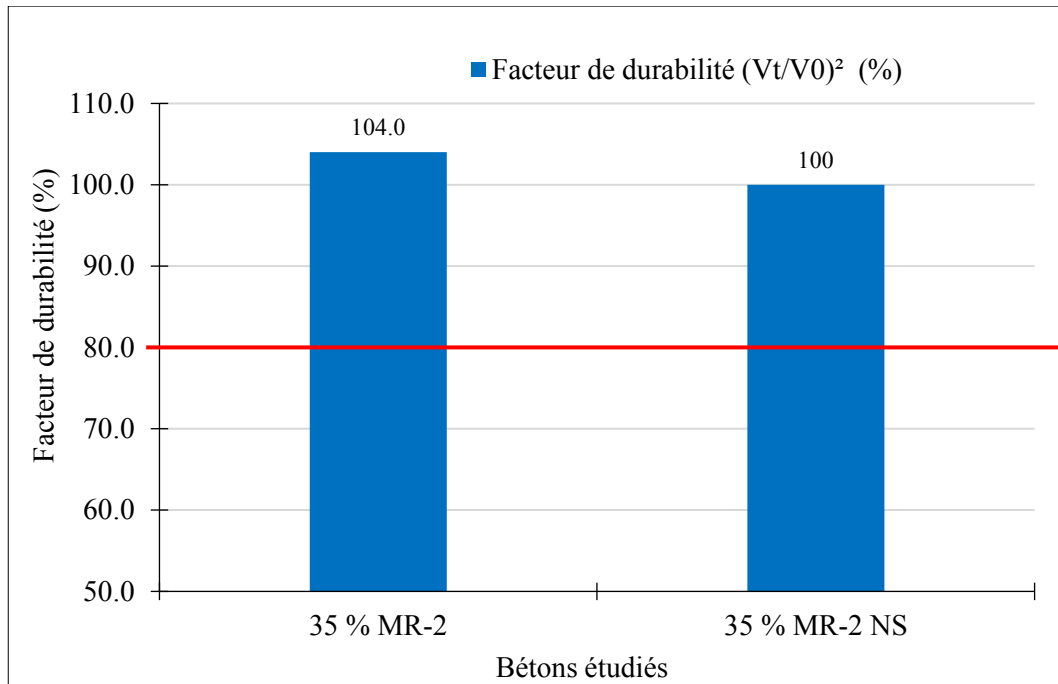


Figure 97 : Facteur de durabilité des bétons étudiés

4.3.3.4 Retrait endogène

Les résultats obtenus du retrait endogène des bétons étudiés avec des GR saturés et secs sont présentés dans la figure 98.

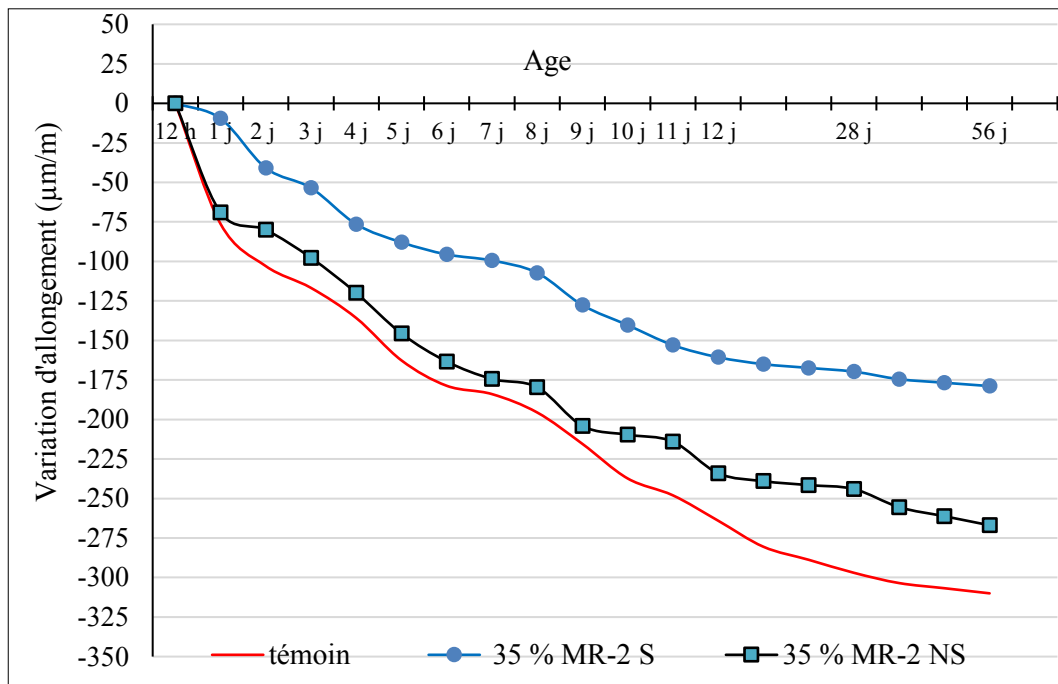


Figure 98 : Résultats des retraits endogènes des bétons étudiés

Les résultats obtenus indiquent que le retrait endogène des BAP contenant des GR secs est plus élevé que celui des BAP contenant des GR saturés. Le retrait observé de ce béton est similaire à jeune âge (1 jour), mais plus faible que le retrait endogène du béton de référence.

4.3.3.5 Retrait de séchage

La Figure 99 présente les résultats de retrait de séchage des bétons étudiés ayant le même rapport E/L et le même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés formulés avec le même type de liant (TerC³) et différents états de saturation des GR.

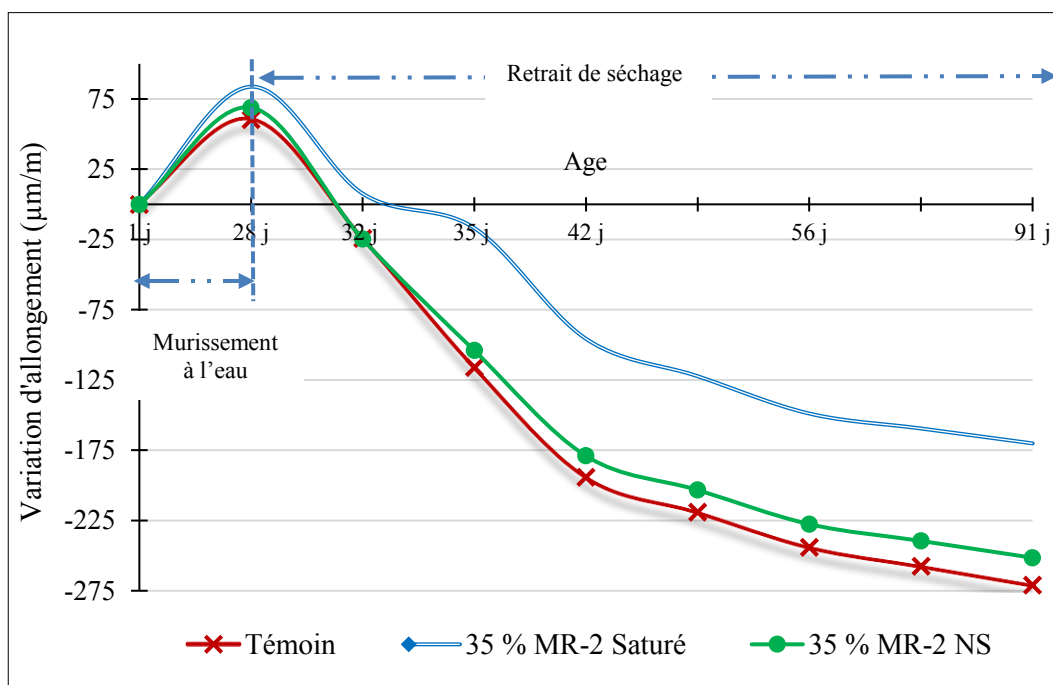


Figure 99 : Résultats des retraits de séchage des bétons étudiés

On observe que le retrait de séchage des BAP aux GR secs est similaire à celui du BAP de référence jusqu'à un âge de 35 jours. De plus, le retrait de séchage des BAP aux GR secs est moins élevé que celui des BAP contenant des granulats naturels. Par ailleurs, le retrait de séchage de BAP aux GR sec est moins élevé que celui du BAP de référence proportionné avec 100% GN.

4.3.4 Mûrissement à l'air

La cure est une étape très importante après le bétonnage, notamment pour le béton à faible rapport E/L. Le but de la cure est d'éliminer le retrait endogène pour avoir une bonne durabilité. Dans cette section, on a déterminé l'effet du mûrissement interne en utilisant des granulats recyclés saturés dans les BAP. Ces BAP sont soumis à un séchage à l'air au laboratoire, une température de $22 \pm$

2°C et une humidité relative de $50 \pm 4\%$. Les résultats de la résistance à la compression et à la traction à 7, 28 et 56 jours sont présentés dans les figures 99 et 100. Chaque résultat présenté est une valeur moyenne obtenue sur deux cylindres à chaque âge.

4.3.4.1 Résistance à la compression

La Figure 100 présente les résistances à la compression des bétons étudiés. On observe une augmentation de la résistance à la compression des BAP contenant 35% de MR-2 en fonction du temps. La valeur de la résistance à la compression à 56 jours des BAP contenant des MR-2 saturés est supérieure à celle des BAP contenant des MR-2 sec.

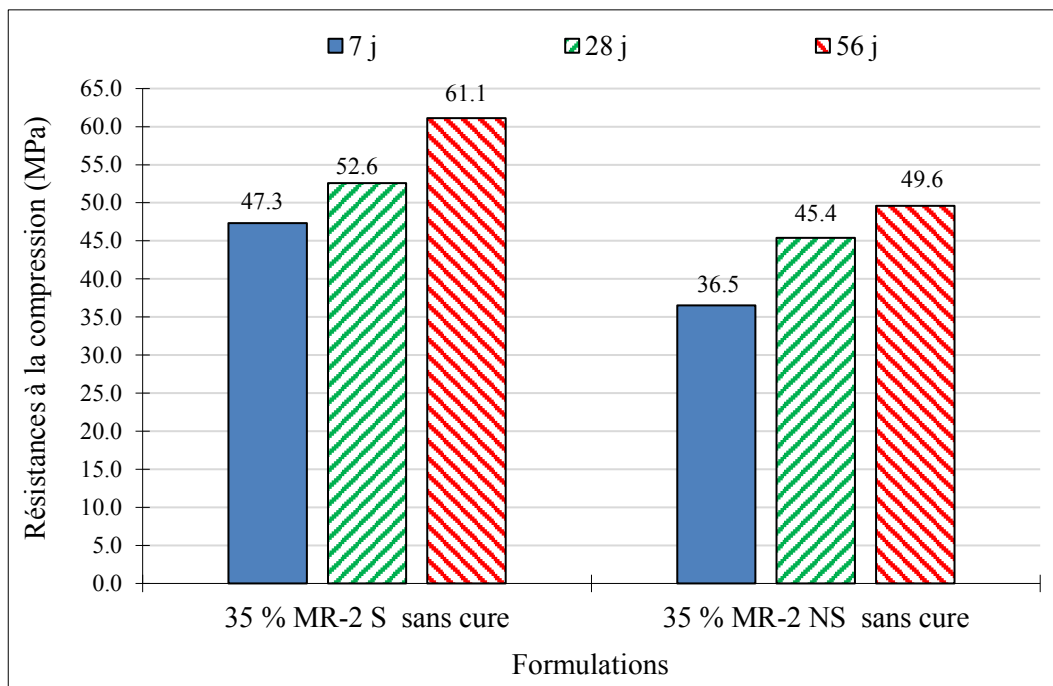


Figure 100 : Résistances à la compression des bétons étudiés (mûrissement à l'air)

4.3.4.2 Résistance à la traction

La Figure 101 présente les résultats des résistances à la traction des BAP étudiés pour le même taux de remplacement, le type de liant TerC³ et différents états de saturation des GR. Les bétons sont soumis à un mûrissement à l'air. On n'observe qu'une légère augmentation de la résistance à la traction en fonction du temps. À 56 jours, la résistance à la traction des BAP à base de GR sec est plus faible que celle des BAP aux GR saturés. Cette différence est aussi observée avec les résistances à la compression. Les BAP aux GR saturés donne une résistance à la compression supérieure à celle des BAP aux GR secs.

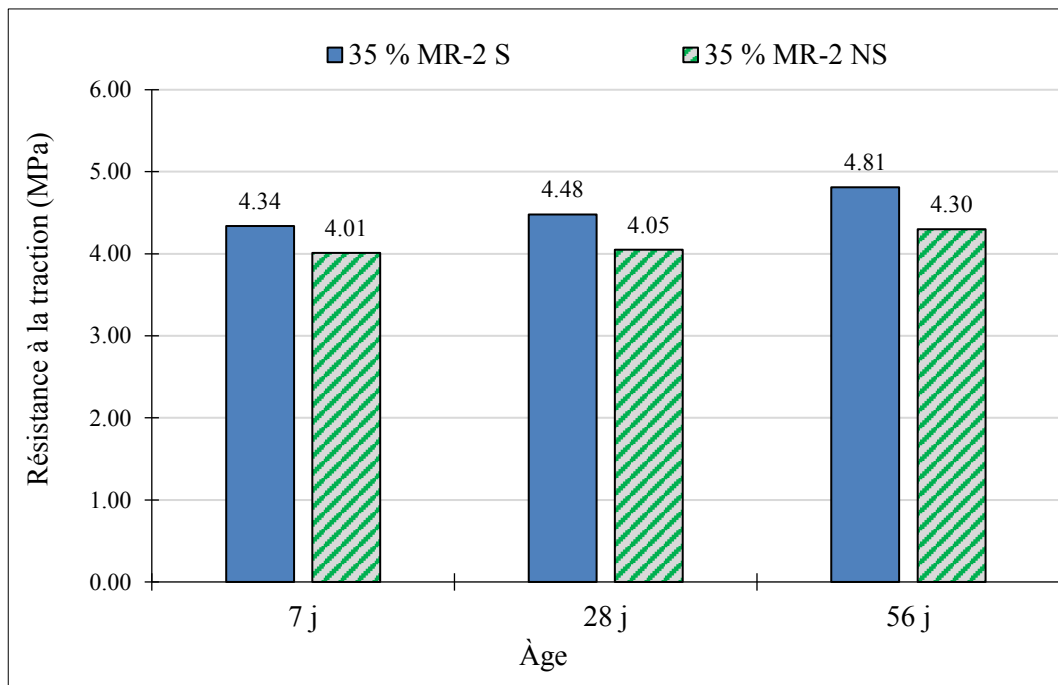


Figure 101 : Résistances à la traction des bétons étudiés (mûrissement à l'air)

4.4 Phase IV - Effet de fractions fines recyclées sur les propriétés du BAP

La dernière phase de cette étude. Consiste à évaluer l'effet de fraction de fines recyclées sur les propriétés du BAP. Ceci permettra d'identifier les propriétés des BAP aux granulats fins recyclés SMR-2 (0-5 mm) et des BAP aux gros granulats recyclés GMR (5-20 mm). Dans cette phase, des GR à l'état saturé, un liant de type TerC³ et un taux de remplacement de GN par des GR de 17,5% sont utilisés. Les essais effectués dans le cadre de cette phase sont : les essais à l'état frais (Étalement, T50, J-ring, masse volumique, teneur en air et la demande en SP), les propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction, en flexion et module d'élasticité) et les essais pour caractériser la durabilité (résistivité électrique, résistance aux ions chlorure, résistance au gel-dégel, retrait endogène et retrait de séchage).

4.4.1 Résultats à l'état frais

4.4.1.1 Masse volumique

La Figure 102 présente les masses volumiques à l'état frais des deux bétons confectionnés avec le même taux de remplacement 17,5%, soient les BAP aux sables recyclés saturés et les BAP aux gros granulats recyclés.

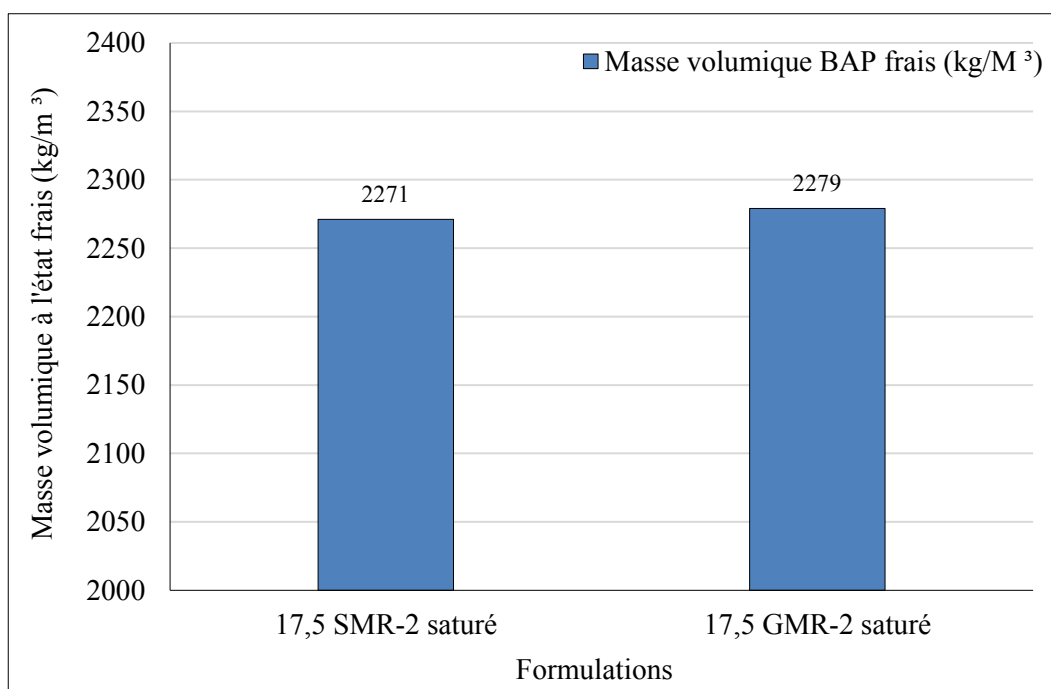


Figure 102 : Masses volumiques des BAP aux SR et des BAP aux gros GR (5-20 mm)

Les bétons fabriqués avec le SR (0-5 mm) ont une masse volumique quasi-similaire que celle des GR (5-20 mm). On a observé que la densité du sable recyclé est inférieure à la densité du gros granulat recyclé, ce qui diminue la masse volumique du béton.

4.4.1.2 Demande en superplastifiant

Les bétons étudiés sont formulés pour développer un étalement de 710 ± 10 mm et un J-Ring de 650 ± 10 mm. Pour chaque type de béton, le dosage en SP est ajouté. On observe que (étalement – J-Ring) des BAP aux SR est de 50 mm, et pour les BAP aux GR l'étalement est de 55mm. On peut dire que les deux bétons respectent la condition (étalement – J-ring < 50 mm).

Dans la Figure 103, on observe que la demande en SP du BAP aux SR est légèrement supérieure à celle des BAP aux GR.

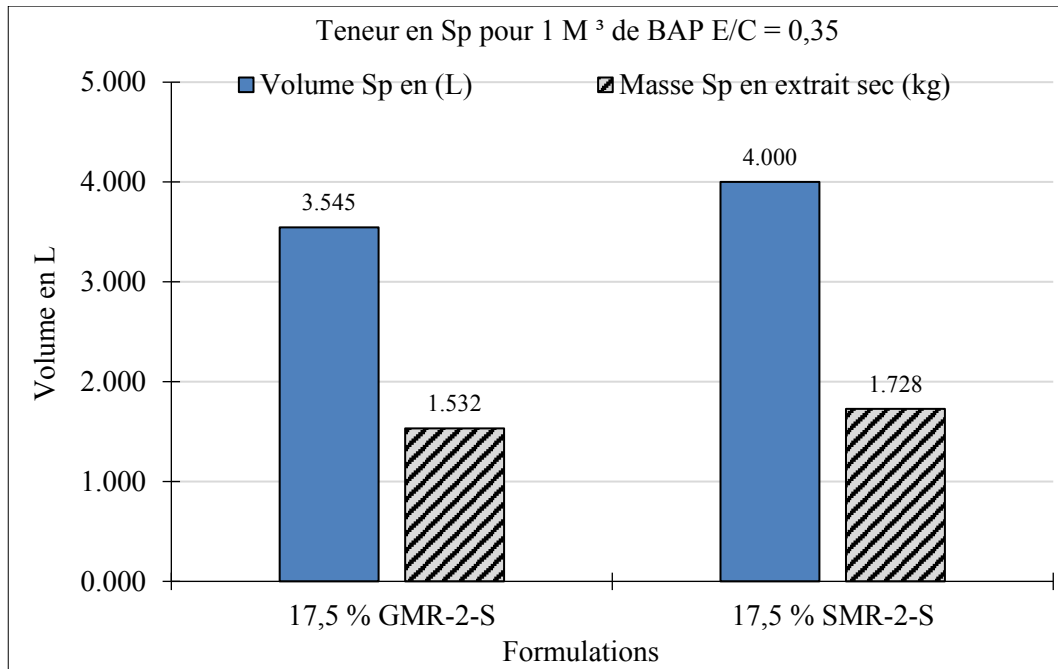


Figure 103 : Teneurs en SP des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.2 Propriétés mécaniques

4.4.2.1 Résistance à la compression

Les résistances à la compression des bétons étudiés sont présentées dans la figure 104.

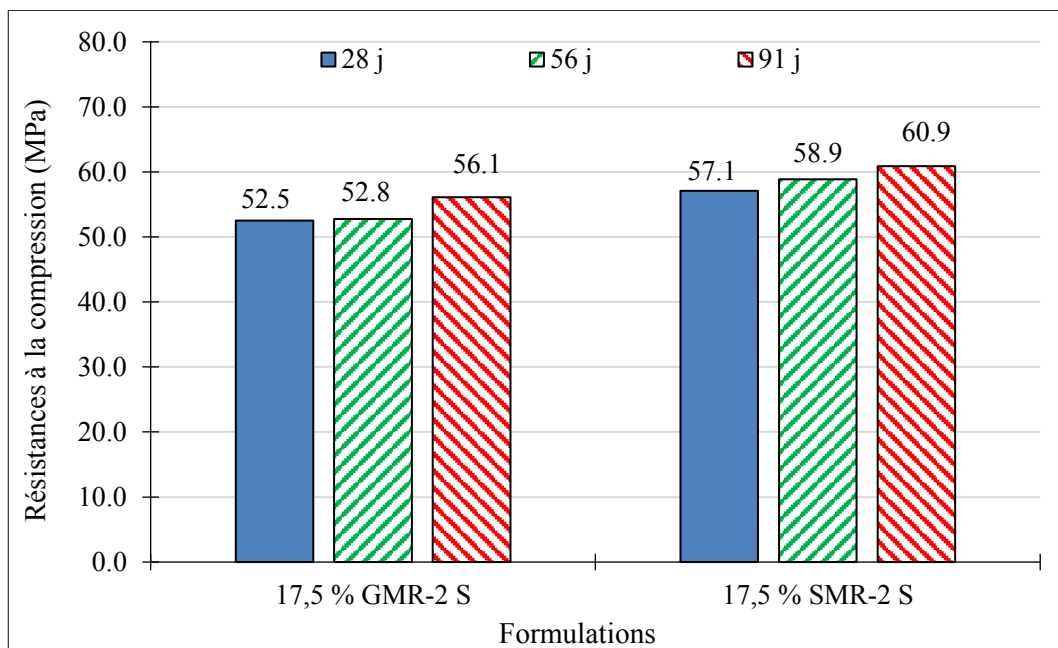


Figure 104 : Résistances à la compression des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)

On observe que les deux bétons montrent des résistances à la compression à 56 jours supérieures à 50 MPa. Il est également observé que La résistance à la compression des BAP aux SR est supérieure à celle des BAP aux GR.

4.4.2.2 Résistance à la traction

Les résultats des résistances à la traction des bétons étudiés dans cette phase sont présentés dans la figure 105. Des résistances à la traction par fendage de BAP aux GR à 28, 56 et 91 jours sont respectivement de l'ordre de 4,9, 5,1 et 5,7 MPa respectivement. Les résultats des résistances à la traction obtenus pour le BAP aux SR sont supérieurs à celles des BAP aux GR pour le même taux de remplacement.

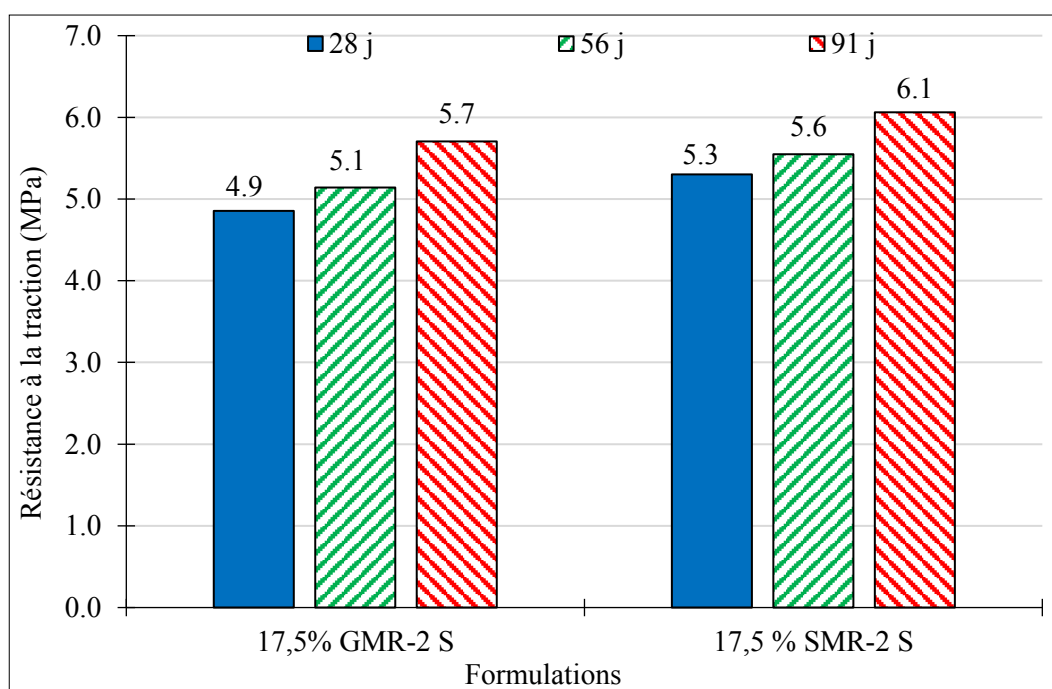


Figure 105 : Résistances à la traction des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.2.3 Résistance en flexion

Les résultats des résistances en flexion des bétons étudiés sont présentés dans la figure 106. On observe que les résistances en flexion des BAP aux SR sont supérieures à celles des BAP avec de gros granulats recyclés. Par ailleurs, les résultats obtenus avec les BAP aux GR indiquent que la résistance à la flexion diminue, cette diminution est probablement due à la présence du mortier résiduel et de la qualité de la zone de transition. Les résistances en flexion des BAP aux GR à 28, 56 et 91 jours sont respectivement de 6, 6,4 et 7,5 MPa. Dans le cas BAP aux SR, les résistances à 28, 56 et 91 jours sont respectivement de 6,2, 7,1 et 7,9 MPa.

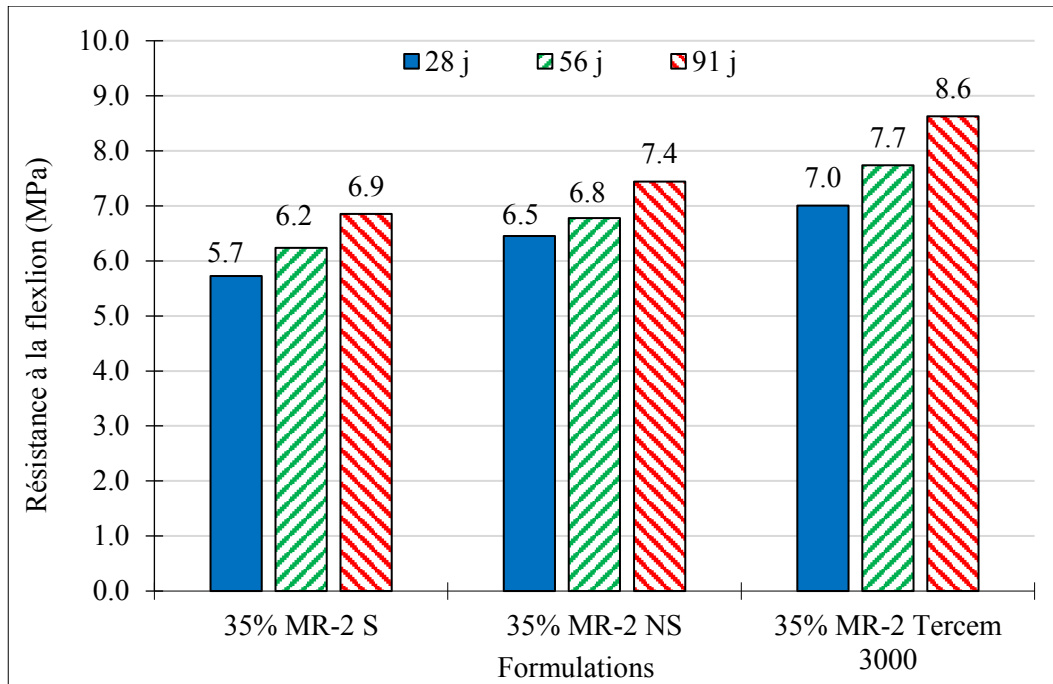


Figure 106 : Résistances en flexion des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.2.4 Module d'élasticité

La Figure 107 présente les modules d'élasticités des bétons étudiés dans cette dernière phase, soient les BAP aux SR et les BAP aux gros GR (5-20 mm).

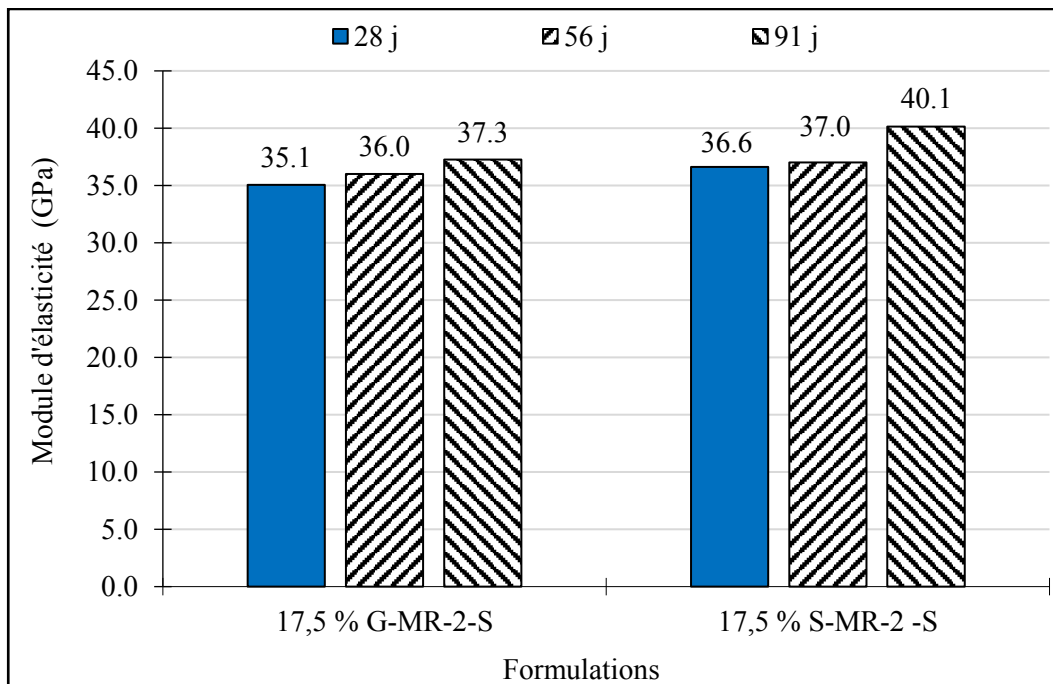


Figure 107 : Résistances à la traction des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GGR)

On observe qu'à 28 jours, les BAP aux SR et les BAP aux GR ont un module d'élasticité comparable. Cependant à l'âge de 91 jours, le béton contenant du sable recyclé développe un module supérieur à celui du béton avec de gros granulats recyclés, de l'ordre de (7,8%).

4.4.3 Durabilité

4.4.3.1 Résistivité électrique

Les résultats des résistivités électriques des bétons étudiés (BAP aux SR et BAP aux GR) dans cette phase sont présentés dans la figure 108. On observe que les deux bétons donnent des résistivités électriques après 28 jours de mûrissement supérieur à (20 k Ω .cm), cette valeur correspond à un béton de très faible perméabilité aux ions chlorure selon la norme ASTM C1202. Pour le même taux de substitution, il est observé que la résistivité électrique des BAP fabriqués avec des granulats fins recyclés est supérieure à celle des BAP fabriqués avec de gros granulats recyclés (5-20 mm) de l'ordre de 28%. À 56 et 91 jours d'âge, les résultats pour les deux bétons très similaires.

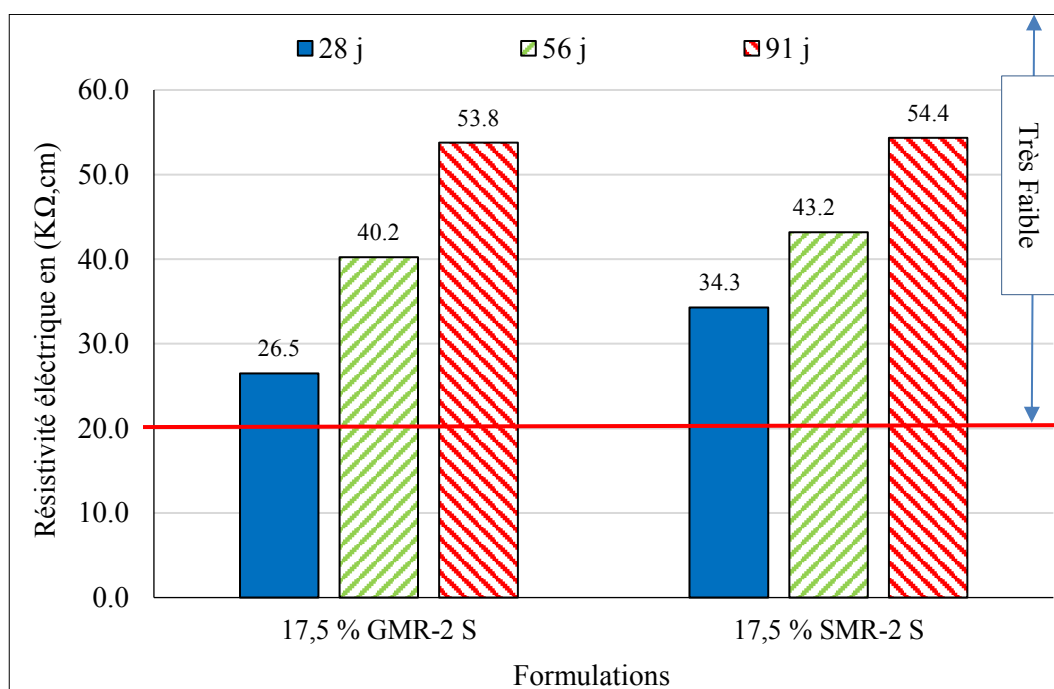


Figure 108 : Résistivités électriques des BAP étudiés (BAP aux SR et BAP aux GR)

4.4.3.2 Résistance à la perméabilité aux ions chlorure

La Figure 109 présente les résultats des résistances aux perméabilités aux ions chlorure des deux bétons (BAP aux SR et BAP aux GR). Les deux bétons montrent de bonnes résistances aux

perméabilités aux ions chlorure. On observe, par ailleurs, que le béton fabriqué avec du sable recyclé donne des résistances à la perméabilité aux ions chlorure plus élevées par rapport au béton fabriqué avec de gros granulats recyclés pour un même taux de remplacement de granulats naturels par des granulats recyclés. Ces résistances correspondent à des valeurs très faibles selon la norme ASTM C1202.

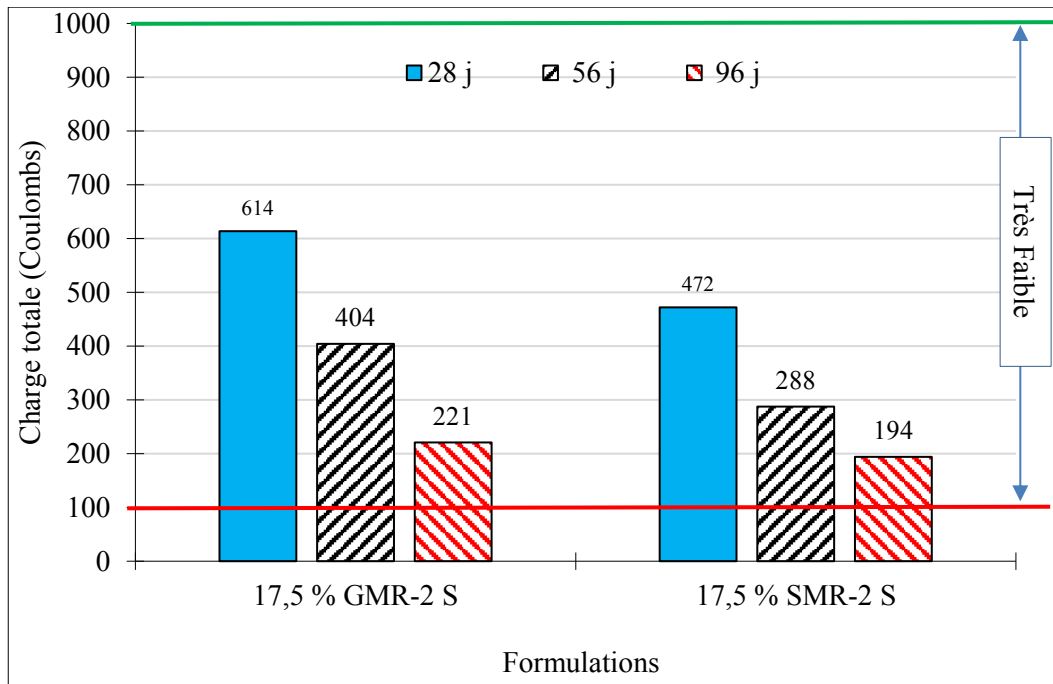


Figure 109 : Résistance à la perméabilité aux ions chlorure (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.3.3 Résistance aux cycles de gel-dégel

La Figure 110 présente les résultats des résistances aux cycles de gel-dégel des bétons étudiés dans cette phase (BAP aux SR et BAP aux GR). Les facteurs de durabilité obtenus après 300 cycles de gel-dégel sont de 102 pour les BAP aux SR et de 99 pour les BAP aux GR. Les deux bétons sont préparés avec un liant TerC³ et un taux de remplacement de 17,5% de granulats recyclés saturés. Le facteur de durabilité observé avec les BAP aux SR est légèrement supérieur à celui des BAP aux GR. Ces résultats correspondant à une bonne résistance aux cycles gel-dégel.

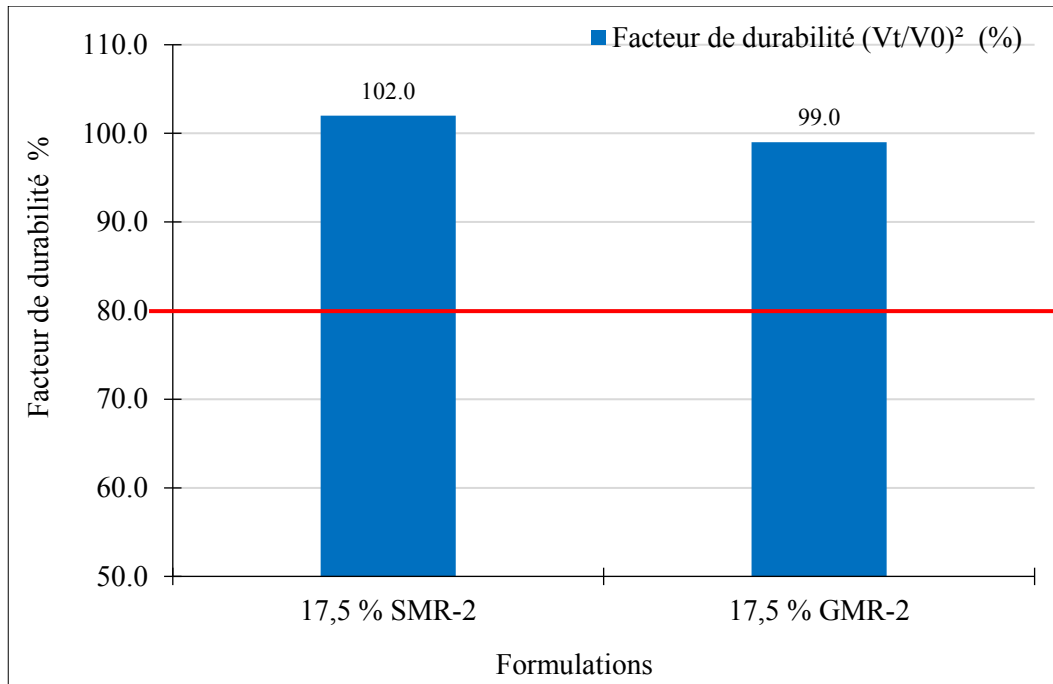


Figure 110 : Résistance aux cycles de gel-dégel (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.3.4 Retrait endogène

L'essai du retrait endogène est effectué sur deux bétons contenant un même taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés (17,5%) (BAP aux SR et BAP aux GR). Les deux fractions des granulats recyclés utilisés sont à l'état de saturation total. Ceci permettra de déterminer l'effet des fractions fines sur le mûrissement interne. Les résultats du retrait endogènes des bétons étudiés avec ($E/L = 0,35$) proportionnés avec un liant TerC³ sont présentés dans la figure 111. On observe que les BAP aux SR donnent un retrait endogène moins élevé que les BAP aux GR. La réduction du retrait des BAP aux SR par rapport aux BAP aux GR à l'âge de 12 jours est de l'ordre de 18%. Les résultats obtenus permettent de conclure que l'utilisation de fractions fines saturées permet un bon mûrissement interne des BAP à faible rapport E/L.

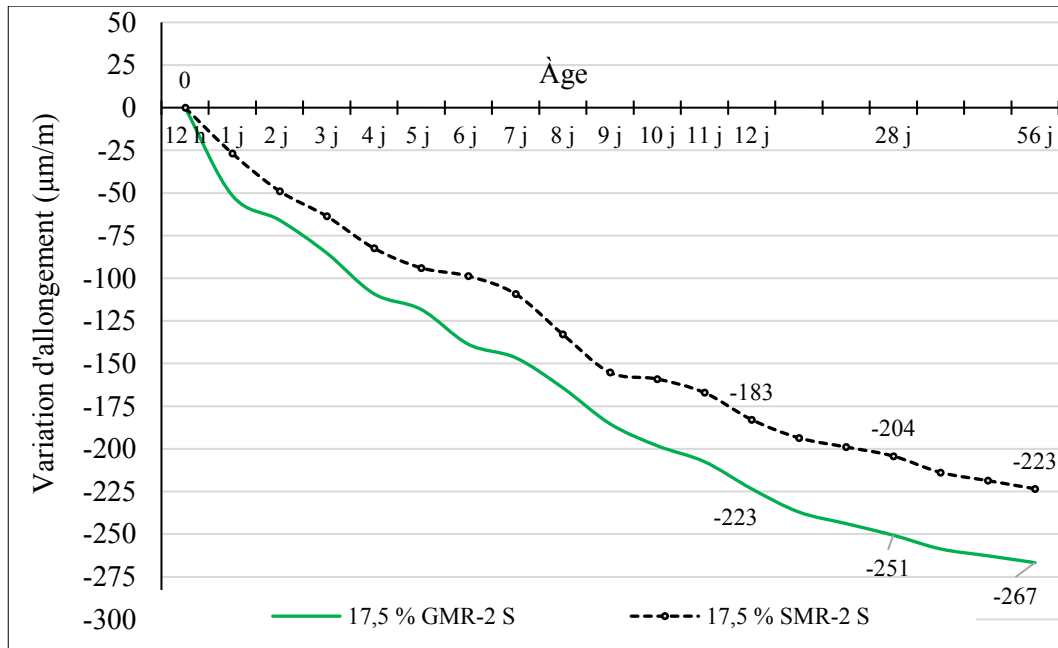


Figure 111 : Retrait endogène (BAP aux SR et BAP aux GGR)

4.4.3.5 Retrait de séchage

Les résultats obtenus de retrait de séchage pour les bétons (BAP aux SR et BAP aux GR) proportionnés avec un rapport E/L de 0,35, des matériaux recyclés saturés et un liant de type TerC³ sont présentés sur la figure 112. L'essai de retrait de séchage est effectué selon les procédures d'essais de la norme ASTM C157.

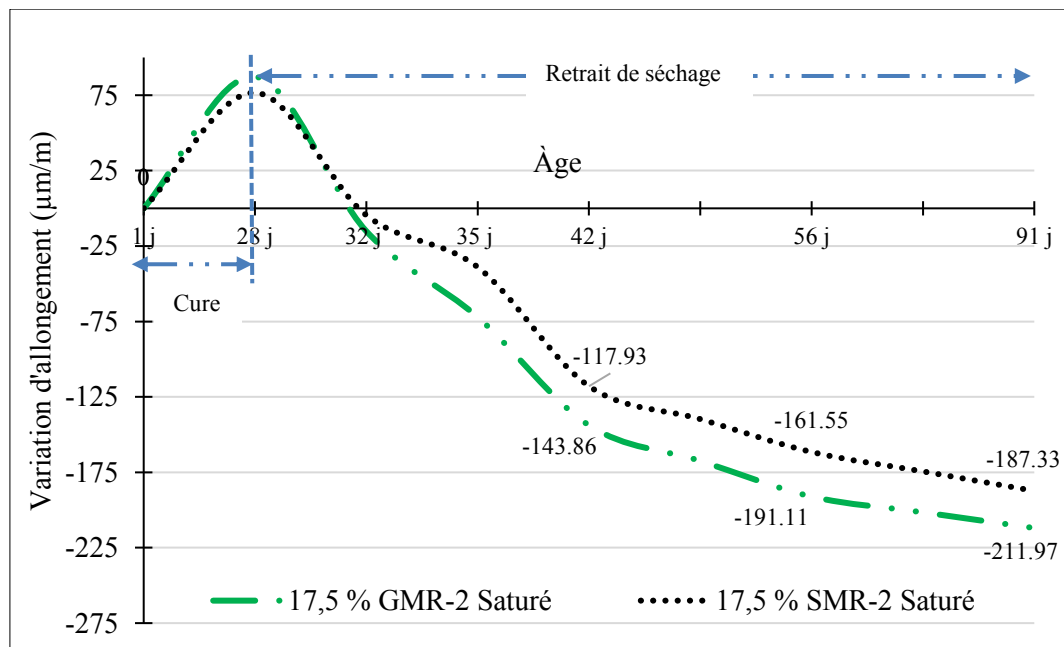


Figure 112 : Retrait de séchage (BAP aux SR et BAP aux GGR)

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

On observe que les BAP aux SR développe un retrait de séchage moins élevé que les BAP aux GR. L'écart entre les deux résultats est de l'ordre de 18%.

CHAPITRE 5 **ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

Dans ce chapitre, on procède à l'analyse des résultats obtenus. En identifiant les propriétés des GR ayant un impact sur le comportement des BAP fabriqués avec des GR à différents taux de remplacement (0%, 20%, 35% et 50%). Les granulats recyclés sont utilisés à l'état saturé. Le comportement des BAP proportionnés avec 35% de granulats recyclés, et des fractions fines de granulats recyclés sont également étudiés.

5.1 Caractérisation

5.1.1 Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur le granulat recyclé de classe MR-2 (5-20 mm) montrent que celui-ci respecte les exigences granulométriques de la norme CSA A23.2-2A pour un gros granulat de béton, comme le montre la figure 51, section (4.1.1.4) du la 4^e chapitre. La courbe granulométrique est incluse dans le fuseau normalisé. En effet, le GMR-2 est conforme aux exigences de la norme CSA pour un gros granulat de béton (5-20 mm). Pour le sable recyclé de MR-2 (0-5mm), la distribution granulométrique est légèrement à l'extérieure de la limite supérieure de la norme CSA (Figure 113), ce qui explique le pourcentage des particules fines plus élevé de l'ordre de 17%, qui est supérieure à la normale (8 à 10%). Le module de finesse du sable recyclé est de 2,77, légèrement inférieur au module de finesse du SN (2,88). Le module de finesse du granulat fin ne doit pas être inférieur à 2,3, ni supérieur à 3,1 [CSA A.23.1 A23.2].

Dans le cadre de la formulation du béton, l'optimisation granulaire de Fuller Thompson, pour le mélange avec 100% de granulats recyclés MR-2 (0-20 mm), est similaire et plus proche de la courbe visée, avec un écart type de 29 et confirme la bonne distribution granulaire. La Figure 114 présente la courbe obtenue par Fuller Thompson, avec 100% MR-2 (0-20 mm).

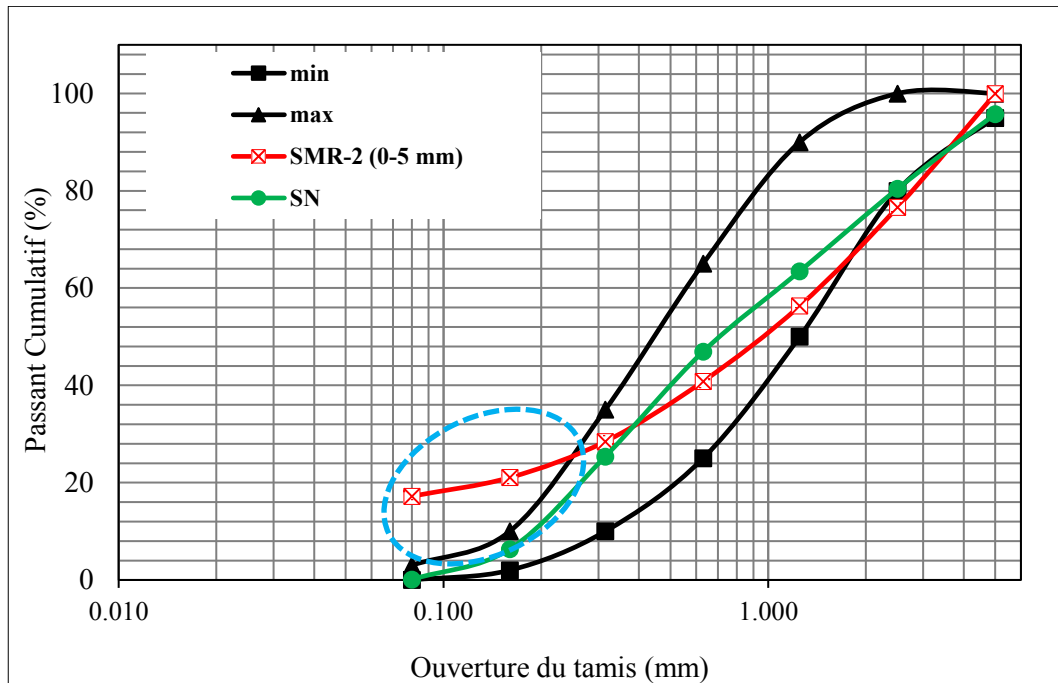


Figure 113 : Courbe granulométrie du sable recyclé de MR-2 comparé avec le SN

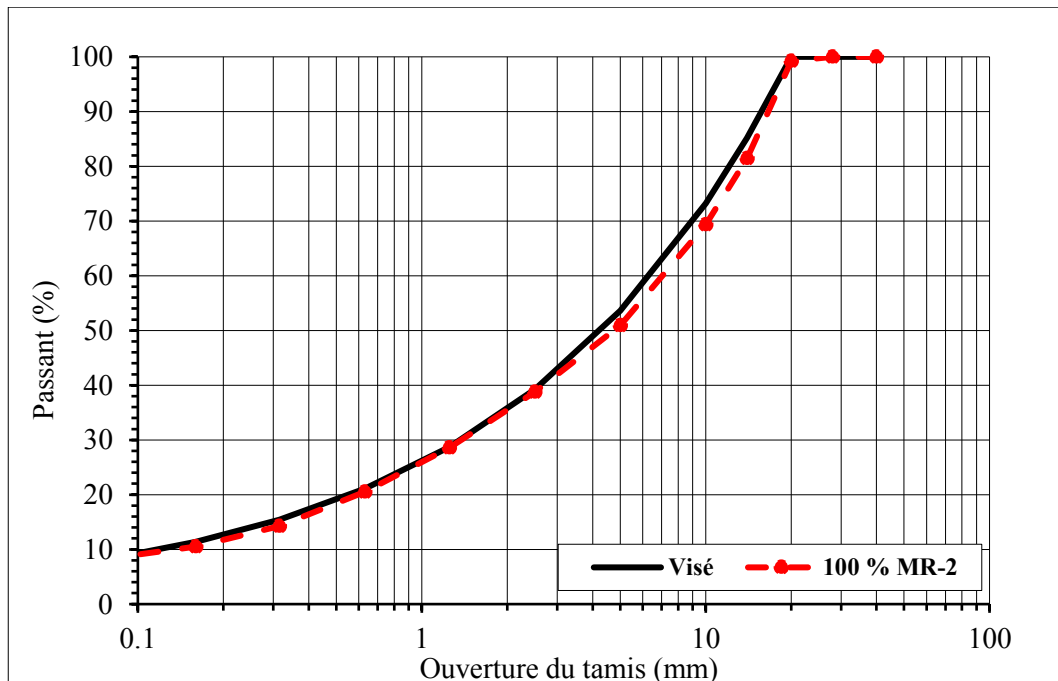


Figure 114 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson

5.1.2 Densité et absorption

La densité du granulat recyclé de classe MR-2 est inférieure à la densité du GN. La présence de matériaux résidus et du mortier attaché sur le GN baissent la densité par rapport au GN.

5.1.3 Cinétique d'absorption

La vitesse d'absorption des granulats fins recyclés (SMR-2) est plus rapide que celle des gros granulats recyclés (GMR-2) de diamètre (5-20 mm). En effet, l'absorption de SMR-2 peut atteindre 100% de saturation après seulement 12 minutes, alors que celle de GR MR-2 n'est atteinte qu'après 22 minutes. La vitesse d'absorption de GR comme tel est plus rapide que les deux fractions séparées, et peut atteindre la saturation après 7 minutes. Ces résultats s'expliquent par le fait que la grande porosité des granulats recyclés est plus rapidement accessible à l'eau [Boulay, 2014]. L'absorption du SMR-2 est plus rapide que celle du GMR-2, parce que la quantité des fines est importante. La détermination de la cinétique d'absorption des granulats recyclés donne une bonne indication de l'absorption dans le temps. De plus, la cinétique d'absorption d'eau des granulats recyclés est un paramètre important qu'il faut prendre en compte dans la formulation des bétons. Aussi, cette propriété doit être prise en compte dans le procédé de malaxage en utilisant des GR pré-saturés lors de la préparation du béton, ou la méthode de malaxage par deux étapes.

5.2 Essais sur le béton

Les principaux paramètres évalués dans le cadre des essais sur béton à l'état frais et durci sont : taux de remplacement des granulats recyclés, l'effet de saturation des granulats recyclés lors la production de béton et durant le mûrissement, l'effet du type de liant et la fraction fine des granulats recyclés. Dans le cadre de cette étude, tous les bétons étudiés dans les trois phases sont proportionnés avec rapport E/L égale (0,35). Ces mélanges correspondent à des bétons de classe (C-XL), une résistance à la compression à 56 jours supérieure à 50 MPa, une teneur en air entrainé de 5 à 8% et une résistance à la perméabilité aux ions chlore inférieure à 1000 Coulombs.

5.2.1 Analyse du comportement de béton autoplaçant à l'état frais

Phase II : Étude paramétrique sur béton autoplaçant ($E/C = 0,35$ et le Liant de type TerC³)

a. Étalement et J-Ring

L'utilisation des granulats recyclés totalement saturés (état saturé surface sèche « SSS »), est un point positif et présente un avantage pour une bonne maniabilité des bétons autoplaçants,

notamment les BAP à faible rapport E/L. En effet, la fluidité des BAP aux GR saturés est supérieure à celle des BAP aux GR secs. Ces résultats confirment. La tendance observée dans littérature les travaux de (Maftah *et al.*, 2011). Par ailleurs, tous les mélanges fabriqués avec des GR saturés respectent la condition (étalement – J-Ring < 50 mm) de la norme ASTM C1621.

Phase III : Effet de l'état de saturation des GR et du type de liant (E/L = 0,35 et 35 % MR-2) sur les propriétés des BAP

a. Masse volumique

La masse volumique des BAP aux GR secs à l'état frais est inférieure aux BAP avec des GR saturés. Cette différence est probablement due à la présence de l'eau dans les pores des granulats recyclés saturés, ce qui augmente la densité des granulats. La masse volumique des BAP aux GR proportionnés avec le liant ternaire Tercem3000 est légèrement inférieure à celle des BAP aux GR fabriqué avec le liant TerC³.

b. Étalement et J-Ring

Pour un même taux de remplacement des GR, les bétons fabriqués avec des GR secs nécessitent des teneurs en SP plus élevées par rapport aux bétons avec des GR saturés pour atteindre un étalement visé. Cette demande en SP s'explique par une forte absorption des GR non saturés. La consommation d'eau de gâchage contenant du SP dilué. Affecte la quantité du SP disponible pour fluidifie le mélange, ce qui réduit l'étalement. Les BAP fabriqués avec des granulats recyclés à l'état saturé présentent une meilleure ouvrabilité, ce qui peut se traduire une mise en place facile par rapport aux BAP avec des granulats recyclés à l'état sec. Par ailleurs, il est observé que les BAP aux GR secs ne respectent pas la condition (étalement – J-Ring < 50 mm).

Phase IV : Effet de fraction fine recyclée sur les propriétés du BAP

a. Masse volumique

La masse volumique des BAP fabriqués avec du sable recyclé est légèrement inférieure à celle des BAP fabriqués avec de gros granulats recyclés. Cela peut s'expliquer par la densité du sable recyclé plus faible que celle du gros granulat recyclé et la quantité des fines dans le SR.

b. Étalement et J-Ring

Les résultats obtenus montrent que la demande en SP des BAP aux SR est supérieure à celle des BAP aux GR. Cependant, les deux bétons respectent la condition (étalement – J-ring < 50 mm) de la norme ASTM C1621.

5.2.2 Analyse des propriétés mécaniques

Phase II : Étude paramétrique sur béton autoplaçant ($E/C = 0,35$ et le Liant TerC³)

a. Résistance mécanique (la compression, traction, flexion et module d'élasticité)

Les pertes des résistances à la compression, à la traction, à la flexion et la rigidité des bétons fabriqués avec des GR saturés à 91 jours sont présentées respectivement dans les figures (115, 116, 117 et 118).

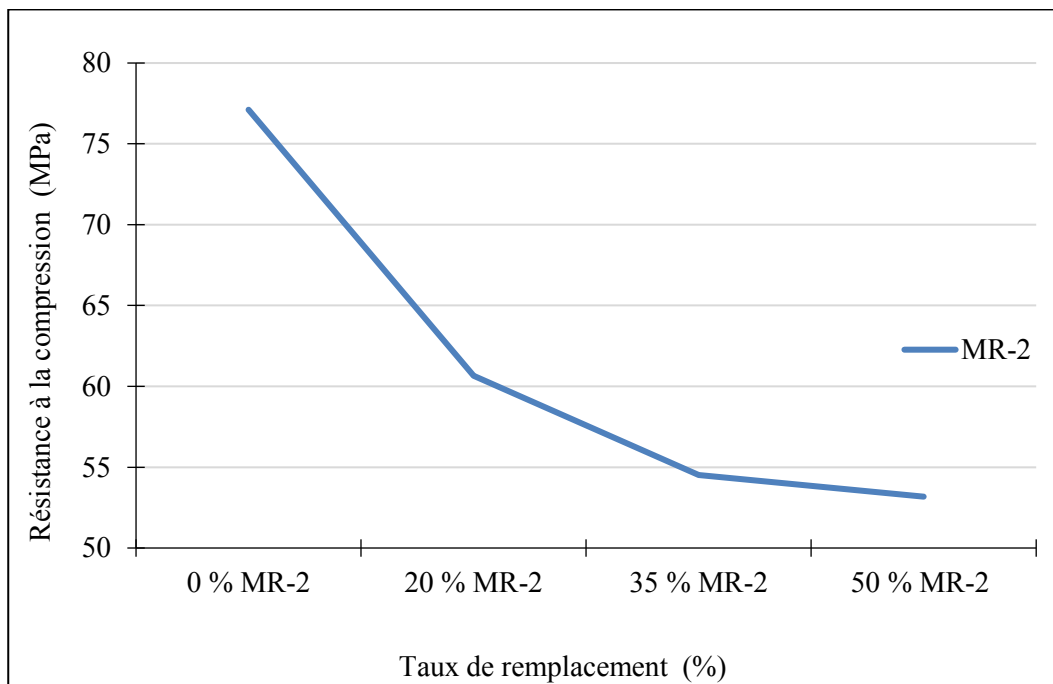


Figure 115 : Pertes de résistance à la compression à 91 jours

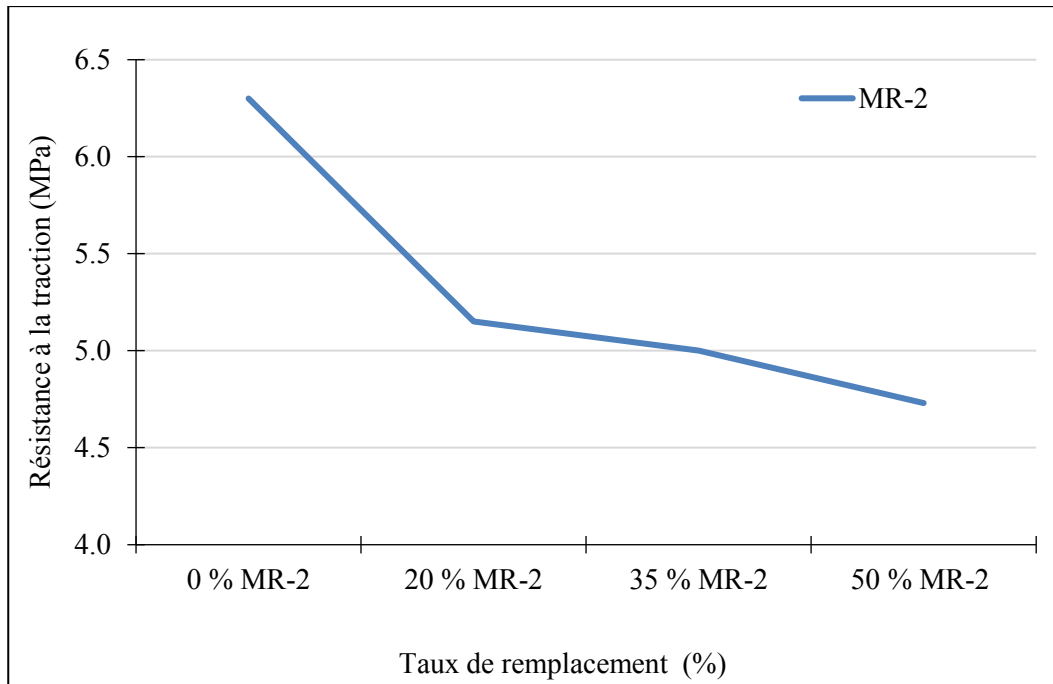


Figure 116 : Pertes de résistance à la traction à 91 jours

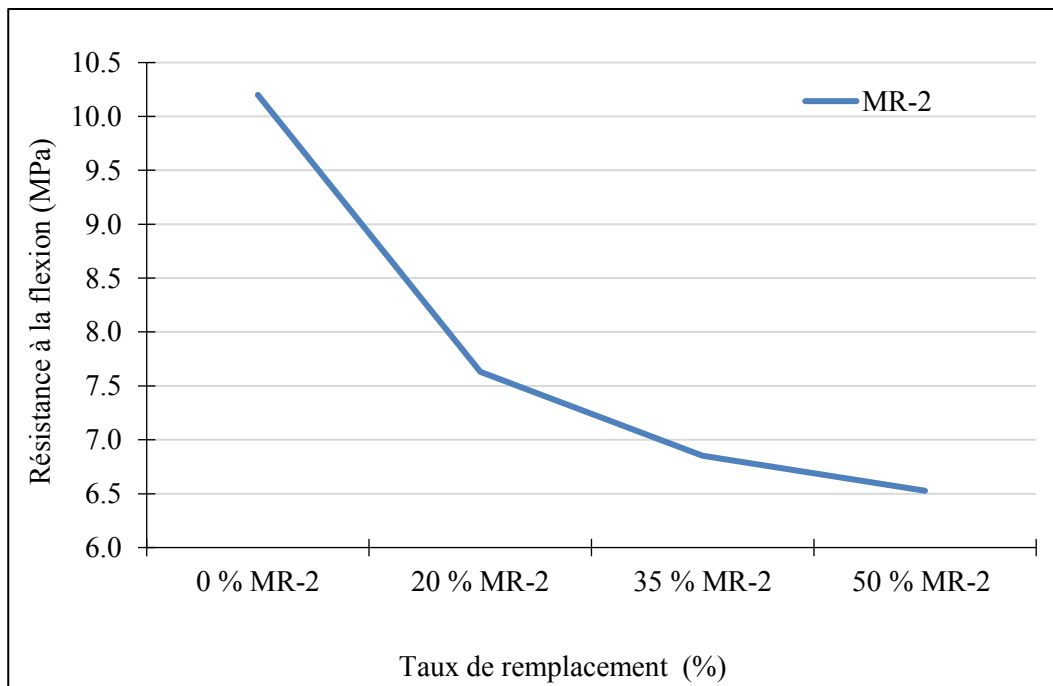


Figure 117 : Pertes de résistance à la flexion à 91 jours

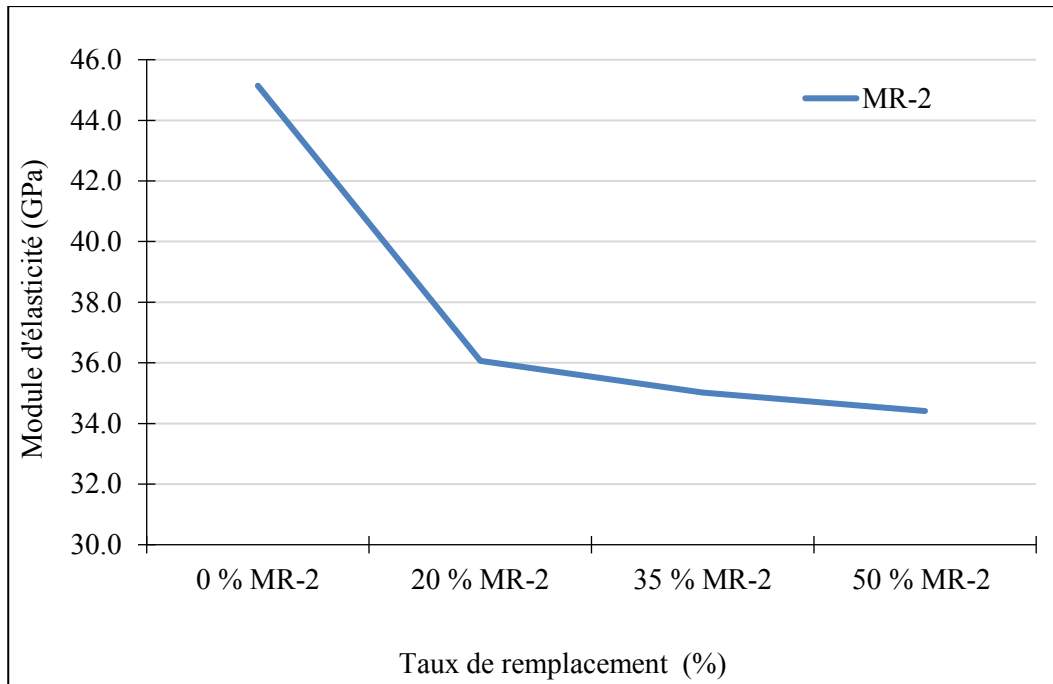


Figure 118 : Pertes de rigidité



Figure 119 : La présence des matériaux résidus et du granulat d'enrobé bitumineux dans la surface de rupture où le moment flexionnel est maximal

Les résistances à la compression, à la traction et en flexion diminuent avec l'augmentation de taux de remplacement des granulats recyclés. Cette diminution est probablement due à la présence de

résidus, tel que l'asphalte (granulat d'enrobé bitumineux) et le mortier de l'ancien béton attaché à la surface du granulat normal (Figure 119). La perte de résistance à la traction des BAP contenant 35% de MR-2, est de l'ordre 10% à 28 jours. Ce pourcentage correspond à la valeur de la limite inférieure (10 à 15%) observé dans la littérature. Il en est de même pour la résistance en flexion. La substitution de 35% de MR-2 représente donc le taux de remplacement optimal pour minimiser l'impact négatif sur les propriétés mécaniques du béton.

b. Module d'élasticité

Étant donné que le béton contenant des granulats recyclés ayant une faible résistance à la compression par rapport au béton de référence (i.e. 100% de GN), il est attendu que son module d'élasticité soit aussi plus faible. Les résultats obtenus dans la section (4.2.5.4) confirment la diminution de la rigidité des bétons fabriqués avec des GR par rapport au béton témoin (100% GN). Le module d'élasticité diminue quand le taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés augmente. Ces résultats sont concordants avec la littérature [Corinaldesi, 2010 ; Boulay, 2014 ; Turcanu, 2017]. La diminution du module élastique est très légère entre les taux de remplacement de 20%, 35% et 50% MR-2 et est de l'ordre de 1% pour 15% de substitution. Par ailleurs, La baisse du module d'élasticité est de 22 % à 91 jours pour un taux de remplacement de 50% de MR-2. Ces résultats sont généralement similaires à ceux présentés dans la littérature. En effet [Corinaldesi, 2010] a observé une baisse du module d'élasticité de 15% à 56 jours pour un taux de remplacement supérieur à 50% alors que [Boulay, 2014] a observé une baisse du module d'élasticité de 30% à 56 jours pour un taux de remplacement de 75%.

D'après les résultats obtenus à l'état frais et l'état durci pour les BAP contenant des granulats recyclés saturés, un taux de remplacement de 20% MR-2 (0-20 mm) affecte très peu les propriétés du BAP. Donc, 20% est le taux de remplacement optimal pour ne pas affecté les propriétés du BAP négativement. Un taux de remplacement de 35% peut aussi être utilisé pour maximiser le remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés dans la composition des BAP. Par ailleurs, les granulats naturels peuvent être remplacés par les MR-2 jusqu'à 50%, sans qu'il y ait un impact négatif très important sur les propriétés du BAP.

c. Fluage

L'analyse des déformations montre une réduction du fluage des bétons fabriqués avec 35% de granulats recyclés totalement saturés de classe MR-2. L'analyse comparative des évolutions des

déformations de fluage montre que le béton témoin développe des déformations supérieures à celles du béton avec 35% de MR-2. Cet écart pourrait s'expliquer en partie par une contrainte de fluage plus importante. La part de déformation liée à la dessiccation est plus élevée pour le béton témoin. Ceci est dû probablement à la diminution du retrait total du mélange aux GR totalement saturés. Ce potentiel de fluage inférieur des BAP avec 35% de MR-2 saturé pourrait être due à un mûrissement interne favorable dans le cas des GR saturé. La diminution du fluage peut aussi être attribuée au module d'élasticité plus faible des BAP avec 35% MR-2 comparé à celui du BAP témoin. Cet effet est surtout sensible pour les bétons à haute performance dont la diminution est de l'ordre de 30%. Ces résultats sont concordants avec la littérature, notamment les travaux sur le comportement des BAP fabriqué avec des granulats légers de [Epesqueux, 2011]

Phase III : Effet de l'état de saturation des GR et du type de liant ($E/L=0,35$ et 35% de MR-2)

Les résistances mécaniques des bétons avec des granulats recyclés totalement saturés sont légèrement faibles que celle des bétons aux granulats recyclés secs. Ceci peut s'explique par, ce qui résulte en la présence de l'eau dans les pores des granulats recyclés saturés. Par ailleurs les BAP aux GR saturés mûries à l'air donnent des propriétés mécaniques supérieures à celui de GR sec. La présence de l'eau dans les pores des granulats recyclés agit comme une source d'eau pour compenser l'eau consommée lors de l'hydratation du ciment et fournit une cure interne au béton. Pour les mélanges fabriqués avec 35% de GR secs, on observe une perte de la résistance à la compression de l'ordre 21% après 28 jours de mûrissement par rapport au béton de référence. Cette perte de résistance est dans la limite supérieure observée dans la littérature (0 à 20 %) [Oliveira et Vazquez, 1996] [Etxeberria *et al.*, 2007, Rahal, 2007 ; Boulay, 2014]. Dans le cas des bétons contenant 35% de GR saturés, la perte de la résistance est de l'ordre 7% au-dessus de la limite supérieure. La résistance des BAP aux GR fabriqués avec le liant tercem3000 est supérieure à celle obtenue avec le liant TerC³. Ces résultats sont conformes aux résultats observés dans la littérature travaux de [Bouly, 2014] et [Turcanu, 2017].

Phase IV : Effet de la fraction fine recyclée sur les propriétés du BAP

Pour le même taux de remplacement de 17,5%, les propriétés mécaniques des bétons fabriqués avec du sable recyclé de MR-2 (0-5 mm) sont supérieures à celles des bétons fabriqués avec des gros granulats MR-2 (5-20 mm). Pour le module d'élasticité, les bétons proportionnés avec le sable recyclé de MR-2 donnent un module d'élasticité supérieur à celui des bétons fabriqués avec les gros granulats recyclés. Ceci est probablement dû à l'ancienne zone de transition des GR qui est

un point de faiblesse. Les baisses observées au niveau du module d'élasticité des BAP aux SR sont relativement faibles par rapport aux autres mélanges. L'impact négatif des granulats fins recyclés sur les propriétés mécaniques est moins important que celui des MR-2 recyclés.

5.2.3 Analyses de la durabilité

Phase II : Étude paramétrique sur béton autoplaçant ($E/C = 0,35$ et le Liant TerC³)

a. Résistivité électrique et résistance à la perméabilité aux ions chlorure

Tous les bétons aux GR étudiés respectent les exigences de la norme ASTM C1760-12. Pour un béton de rapport E/L égale à 0,35, la résistivité électrique est supérieure à la limite inférieure (20 K Ω .cm) après 28 jours de mûrissement. Les charges totales obtenues pour tous les mélanges étudiés se situent entre 258 et 559 Coulombs à 56 jours. Ils ont donc une perméabilité aux ions chlorure très faible (< 1000 Coulombs), selon de la norme ASTM C1220.

Il est observé que la résistance à la perméabilité aux ions chlorure augmente à long terme à (91 jours) pour les mélanges fabriqués avec le liant TerC³ et des granulats recyclés saturés. Cette faible perméabilité aux ions chlorure est due à la présence de la fumée de silice et des cendres volantes dans le liant utilisé.

b. Résistance au gel-dégel

Les bétons proportionnés avec un taux de remplacement jusqu'à 50% des granulats recyclés possèdent une bonne durabilité aux cycles de gel-dégel. Tous les mélanges étudiés ont un facteur de durabilité supérieur à 80% après 300 cycles. Selon la norme ASTM C666, un béton est résistant au gel-dégel, si son facteur de durabilité est supérieur à 80% après 300 cycles gel-dégel.

c. Résistance à l'écaillage

Selon la classification de la note visuelle stipulée dans la norme ASTM C672 et l'échelle d'écaillage entre (0 et 5) après 50 cycles, le niveau d'écaillage des BAP contenant 35% de MR-2 est léger à modéré (de l'ordre de 2). Il y a eu peu d'endommagement observé sur la surface. Les seuls dommages sont dans les GR, à cause de la qualité de l'ancien mortier attaché sur les granulats (Figure 120).



Figure 120 : GR affectés par l'essai d'écaillage

La Figure 121 présente différents échantillons de béton avec des niveaux d'écaillage évalués de (1 à 5) (Association Béton Québec [l'écaillage des surfaces de béton, 2014-P2].

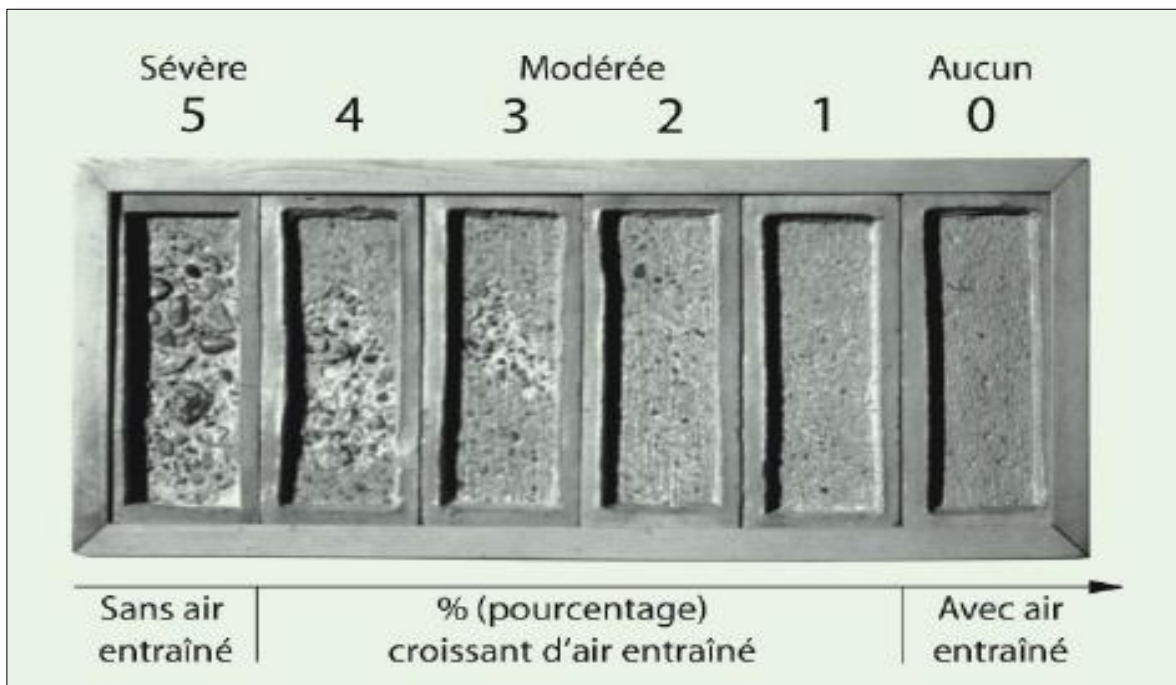


Figure 121 : Écaillage du béton, cote numérique d'évaluation [Association Béton Québec, 2014]

d. Retrait endogène

Le retrait endogène des prismes de béton a été mesuré pour des mélanges (BAP de référence et BAP avec 35% de MR-2 totalement saturé) préparés avec un rapport E/C de 0,35 et un liant ternaire TerC³. La tendance est claire pour les mélanges avec 0% de MR-2 (BAP de référence) et avec 35% de MR-2 saturés (2 jours). En effet, on observe une corrélation directe entre l'utilisation de GR saturés et le retrait endogène. Utilisation des GR saturés permet de réduire le retrait endogène des BAP. Cette tendance se maintient après quelques semaines de mûrissement. Mûrissement favorable à cause de la présence d'eau.

e. Retrait séchage

Le béton proportionné avec 35% de MR-2 saturés donne un retrait de séchage moins élevé que celui béton de référence (une réduction de 37,7% à 63 jours). Il semble donc que dans ce cas l'utilisation d'un granulats recyclés saturé d'eau avec un liant TerC³ compense le retrait de séchage. Dans la littérature on a observé que le retrait de séchage des bétons aux GR secs proportionnés avec un rapport E/C de 0,55 et un ciment GU est plus élevé pour un taux de remplacement entre (50 et 100%) [Boulay, 2014]. Par contre, le remplacement de 35% de GR non saturés présente des valeurs de retrait de séchage similaires au béton témoin [Boulay, 2014] [S.C. Kou, C.S. Poon, 2012]. Les facteurs responsables d'un retrait de séchage élevé des bétons fabriqués avec des granulats recyclés sont la présence de mortier résiduel et l'eau supplémentaire ajoutée lors de la production du béton pour remplir les pores des granulats recyclés [Li, 2008]. Dans notre cas, pour les BAP à faible rapport E/L (égale à 0,35), on a observé que l'utilisation des GR totalement saturés avec un liant TerC³ a un effet bénéfique sur le retrait de séchage. Nos résultats sont concordants avec les résultats publiés par [Boulay, 2014].

Phase III : Effet de l'état de saturation de GR et type de liant (E/L = 0,35 et 35% MR-2)

a. Résistivité électrique et résistance à la perméabilité aux ions chlorure

Les résistivités électriques et la résistance à la perméabilité aux ions chlorure des deux bétons confectionnés dans cette phase (BAP aux GR à l'état sec fabriqués avec un liant TerC³ et BAP aux GR à l'état saturé fabriqués avec le liant Tercem3000) donnent des valeurs supérieures à 20 kΩ.cm à 28 jours de mûrissement et des valeurs inférieures à 1000 coulombs après 56 jours de mûrissement humide. Ceci correspond à une résistance aux ions chlorure très faible selon la norme ASTM C1202. Les résultats pour ces deux bétons sont comparés avec le béton optimisé dans la

phase précédente (BAP aux GR à l'état saturé fabriqué avec le liant TerC³). Les BAP aux GR secs donnent des résistivités électriques légèrement supérieures à celles des BAP aux GR saturés et des résistances à la perméabilité aux ions chlorure inférieures pour le même taux de remplacement et le même type de liant. Cette légère différence est due probablement au relâchement de l'eau par les GR saturés dans le mélange pendant le mûrissement, ce qui augmente le rapport E/L. Ces valeurs sont inférieures à celles des BAP aux GR saturés fabriqués avec le liant Tercem3000 à jeune âge (28 jours), mais elles sont supérieures à long terme. Cela peut s'expliquer par l'effet du type de liant, la présence de cendres volantes dans le liant TerC³ qui améliore la résistance par la réaction pouzzolanique. L'évaluation de la résistance aux ions chlorure des mélanges à base de liant Tercem3000 est très lente. La charge totale mesurée est de 420 Coulombs à 56 jours. Selon de la norme ASTM C1220, ce mélange représente une perméabilité aux ions chlorure très faible. Les types de liants utilisés ont un grand impact sur cette propriété. Ces résultats sont concordants avec la littérature [Boulay, 2014 ; Turcanu, 2017]. Le fait que l'essai a été effectué à 56 jours a permis de bien voir l'effet bénéfique des cendres volantes.

b. Retrait endogène et de séchage

Le retrait endogène des bétons proportionnés avec des GR secs est similaire à celui du béton de référence avec 100% GN. Après une semaine, le retrait endogène des bétons aux GR non saturés est moins élevé par rapport à celui du BAP de référence. Cela s'explique, probablement, par le relâchement de l'eau absorbée par les GR lors de la production du béton, ce qui peut contribuer à réduire le retrait endogène. Pour le même taux de remplacement 35% de MR-2 (0-20 mm), le retrait endogène des BAP aux GR secs est plus élevé par rapport aux BAP fabriqués avec des granulats recyclés saturés. Cette réduction est probablement due à la présence de l'eau dans les pores des granulats recyclés qui compose l'eau évaporée. Ces résultats concordent avec la littérature (document d'Association béton Québec) sur l'utilisation des granulats poreux saturés pour le mûrissement interne. Ce résultat concorde avec le résultat publié par [Boulay, 2014] qui utilise un liant TerC³ dans la composition du béton contenant des granulats recyclés pré-saturés. Par ailleurs, dans la même étude, l'utilisation d'un ciment GU dans le béton aux GR augmente le retrait de séchage.

c. Mûrissement à l'air

Les résistances à la compression et à la traction indirecte des bétons dans des conditions de mûrissement à l'air montrent que les BAP aux GR saturés donnent de meilleures résistances à jeune

âge et à long terme. Cela peut s'expliquer par la présence de l'eau dans les pores des granulats recyclés saturés qui contribue à l'amélioration des résistances des BAP aux GR saturés. Celle-ci a un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques.

Phase IV : Effet de la fraction fine recyclé sur les propriétés du BAP

a. Résistivité électrique et résistance à la perméabilité aux ions chlorure

Il est important de noter que les deux bétons étudiés (BAP aux GR saturés et BAP aux GR secs) correspondent à un béton ayant une perméabilité aux ions chlorure très faible (<1000 Coulombs). La perméabilité aux ions chlorure ne semble pas être affectée par le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé fin ou gros. Les charges totales obtenues pour les deux mélanges se situent entre 194 et 221 Coulombs à 56 jours de mûrissement à l'eau. Ils ont donc une perméabilité aux ions chlorure très faible (inférieure à 1000 Coulombs et supérieure à 100 Coulombs) selon la norme ASTM C1202.

b. Retrait endogène

Le mélange contenant le sable recyclé de MR-2 saturé présente un retrait endogène significativement moins élevé que le mélange ayant le même taux de remplacement par un gros granulat recyclé saturé. La variation de la longueur du retrait endogène observée pour ce mélange est même inférieure à celle observée pour le béton témoin avec 100% de granulats naturels, et plus proche à celle du béton contenant 35% de MR-2 saturé. Il semble donc que, dans ce cas, la taille des GR saturés a un rôle sur le retrait endogène (déformation sous condition scellée). Nos résultats concordent avec les résultats publiés sur le comportement des bétons autoplaçants préparés avec des granulats légers) [Lepesqueux, 2011]. En effet, l'auteur rapporte que la diminution du retrait endogène du béton contenant des granulats fins légers est due à l'humidité absorbée par ce granulat qui permet de remplacer immédiatement l'eau perdue par l'autodessiccation de la matrice cimentaire [Lepesqueux, 2011]. Le remplacement du sable naturel par un granulat recyclé fin donne un bon mûrissement interne que le remplacement par un gros granulat recyclé.

c. Retrait de séchage

Le BAP utilisant le sable recyclé saturé présente un retrait de séchage significativement moins élevé que les BAP ayant le même taux de remplacement du gros granulat recyclé. La variation de la longueur observée pour ces BAP est inférieure à celle observée pour le béton de référence. Ceci

peut s'expliquer par la taille du GR, le pourcentage de l'absorption et la surface de contact du GR dans le béton.

CHAPITRE 6 **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

6.1 Conclusions

L'apport de cette étude permet de confirmer la possibilité de valorisation des granulats recyclés comme remplacement des granulats naturels. Étant donné que les granulats recyclés sont des granulats poreux et ont généralement une cinétique d'absorption d'eau rapide, on peut éliminer cet effet par la saturation avant le bétonnage. La présence de l'ancien mortier (i.e mortier résiduel) à la surface des particules des GR est aléatoire et inévitable et il faut la considérer comme une caractéristique intrinsèque du matériau.

Les résultats de la première phase montrent que :

- L'analyse granulométrique des granulats recyclés MR-2 modifiés est incluse dans le fuseau normalisé de la norme CSA.A23 ;
- La densité des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels ;
- L'absorption d'eau par les granulats recyclés de classe MR-2 est liée principalement à la présence du mortier résiduel ;
- La cinétique d'absorption est liée généralement à la taille des granulats, notamment les particules fines de MR-2, qui ont une absorption très importante ;

Par ailleurs, les résultats de la caractérisation des BAP contenant des GR saturés à l'état frais indiquent que :

- La saturation totale des granulats recyclés à l'eau assure une maniabilité permettant une mise en œuvre adéquate ;
- La demande en superplastifiant des bétons aux GR saturés est plus faible que celle des bétons fabriqués avec des GR secs ;
- Présence du mortier résiduel peut présenter un effet positif pour la fluidité des bétons autoplacants à faible rapport E/L.

Dans le cadre de la deuxième phase, les propriétés mécaniques des BAP aux GR sont évaluées. Il est observé les propriétés diminuent avec, le taux de remplacement des granulats recyclés. Cependant, Les granulats naturels peuvent être remplacés par des granulats recyclés de classe MR-2 jusqu'à 50% sans qu'il y ait d'importante des propriétés mécaniques des bétons avec des granulats

recyclés saturés sont légèrement faibles, comparativement à celles des bétons aux granulats secs. Suite à l'analyse des résultats des essais mécaniques et de durabilité sur des bétons autoplaçants fabriqués avec des granulats recyclés saturés et secs, on constate que les propriétés varient généralement en fonction des paramètres suivants :

- Les taux de remplacement des granulats recyclés dans les bétons. Le remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé affecte négativement la résistance à la compression du béton, à la traction indirecte, à la flexion et le module d'élasticité. Les propriétés mécaniques diminuent avec le taux de remplacement des granulats naturels par les granulats recyclés.
- Les granulats naturels peuvent être remplacés par les MR-2 jusqu'à 50%, sans qu'il y ait un impact négatif très important sur les propriétés du BAP.
- L'impact négatif des granulats fins recyclés sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton autoplaçant est moins important que celui des gros granulats recyclés.
- La qualité de l'ancien béton variable varie avec l'absorption et la porosité des granulats recyclés ;
- La quantité importante des fines dans les granulats recyclés diminue la résistance des BAP ;
- Les conditions de cure à l'eau ont un impact négatif sur les bétons proportionnés avec des granulats recyclés totalement saturés [Les propriétés mécaniques diminuent, bien que le durcissement à l'air de ces bétons donne un bon comportement mécanique ;
- Le remplacement du sable naturel par des granulats recyclés fins permet un bon murissement interne que le remplacement des gros granulats naturels par des gros granulats recyclés.
- Pour un taux de remplacement de 35% en volume, le BAP fabriqué avec granulat recyclé a eu un fluage relativement plus faible que le béton témoin.

Les granulats recyclés totalement saturés, n'affectent pas l'ouvrabilité, éliminent l'effet d'absorption lors de la production béton et minimisent la demande en superplastifiant. Au niveau de la durabilité, les GR saturés compensent le retrait endogène à jeune âge et le retrait de séchage à long terme. Dans le cas de l'utilisation du liant TerC³.

Finalement, les résultats obtenus sur les BAP aux GR fabriqués avec un liant TerC³ montrent qu'on peut formuler un béton autoplaçant à faible rapport E/L contenant des GR de classe MR-2 (0-20

mm) en utilisant de 20 à 35% des granulats recyclés. Ces pourcentages dépendent de l'application des bétons destinés et des performances mécaniques désirées.

Par ailleurs, l'utilisation des granulats recyclés saturés en eau puissent offrir des possibilités intéressantes de diminution des effets du retrait, notamment le retrait endogène. La compensation peut permettre l'élimination complète des déformations dues au retrait. L'étude des BAP à retrait compensé comme des matériaux de réparation revêt donc un intérêt particulier.

6.2 Recommandations

Ce projet de recherche a permis de répondre à la question de la faisabilité de formuler un BAP contenant des granulats recyclés de type MR-2 totalement saturé avec un taux de remplacement optimal et répondant aux exigences d'ouvrabilité, des propriétés mécaniques et de durabilité. Ces travaux de recherche effectués contenant une base de données importante et permet d'ouvrir d'autres piste à explorer. On peut noter notamment :

- Étude de la rhéologie des bétons autoplaçants à faible rapport E/L proportionnés avec des granulats recyclés saturés, notamment des BAP contenant du sable recyclé.
- Étude du fluage des bétons dans des conditions non scellées.
- Étude du mûrissement interne des bétons de masse fabriqués avec des GR saturés.
- Modification de la granulométrie des granulats recyclés, pour éliminer la fraction supérieure à 20 mm et minimisation de la quantité des fines.
- Étude potentielle d'utilisation des BAP aux granulats recyclés pour la réparation des ouvrages en béton, vu qu'aucun grand risque d'utiliser un taux de remplacement de granulats naturels par des granulats recyclés saturés allant jusqu'à 35%. Peut améliorer la durabilité, notamment le retrait endogène pour des bétons à faible rapport E/L.
- Étude coût / performance des BAP avec des granulats recyclés.
- Préservation des ressources naturelles, réduction de l'accumulation des bétons de démolition et une gestion durable des déchets.

ANNEXE A – DONNÉES



Figure A-1 : Tamisage des fractions grossières et fines



Figure A-2-1 : Résultats de tamisages des gros granulats de MR-2



Figure A-2-2 : Résultats des tamisages granulats fins de MR-2

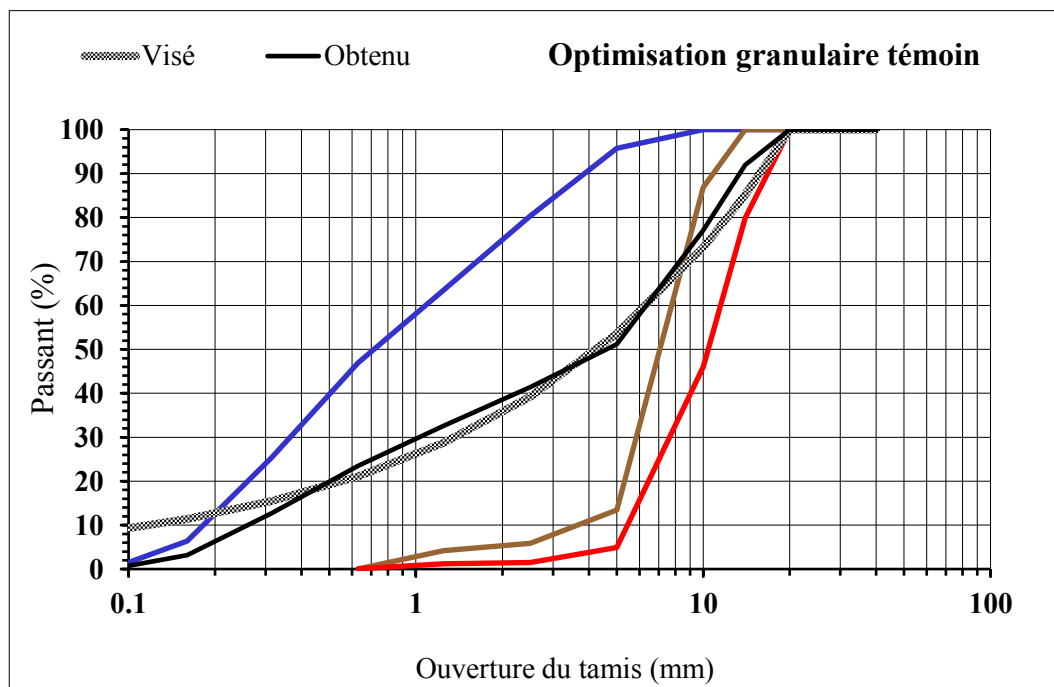


Figure A-3 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 100 % GN

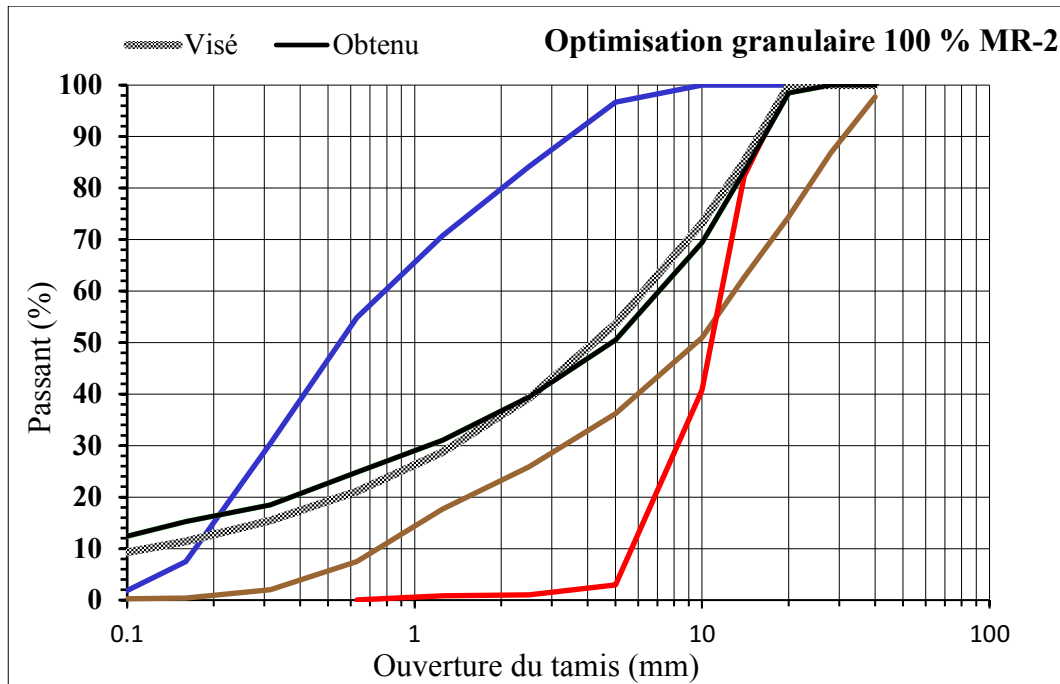


Figure A-4 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 100 % MR-2

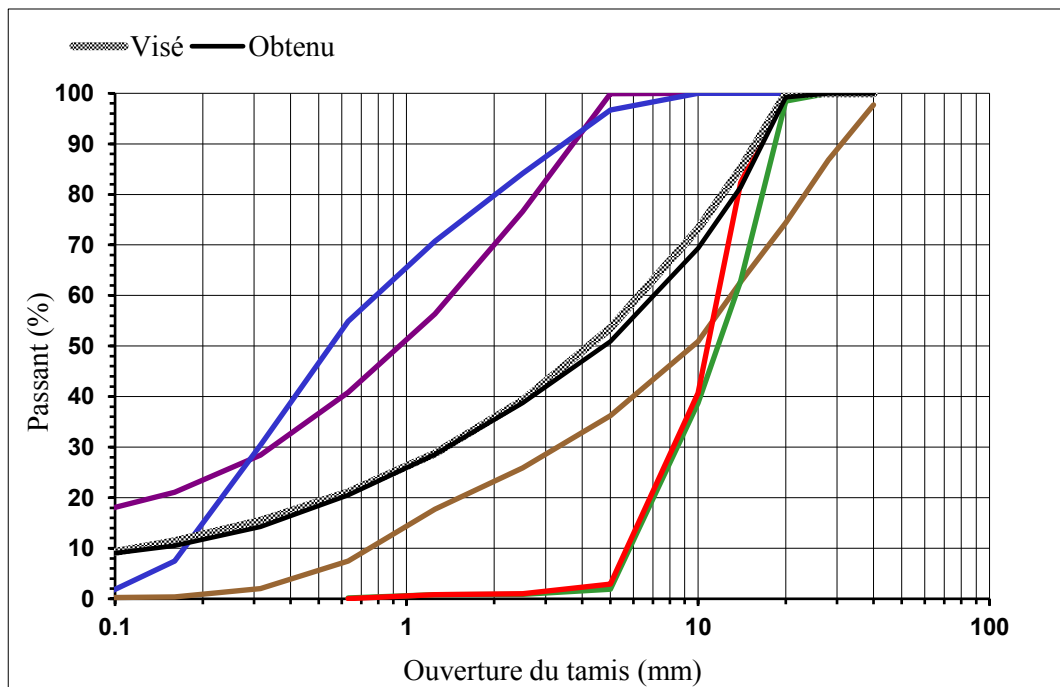


Figure A-5 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 50 % GN et 50 % MR-2

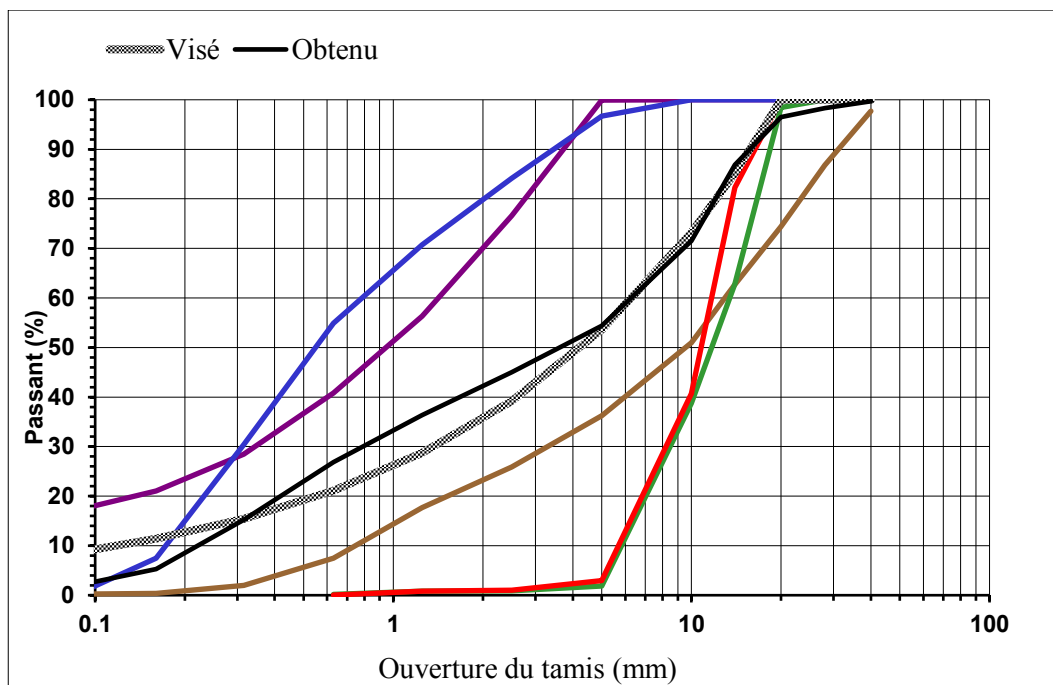


Figure A-6 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 80 % GN et 20 % MR-2

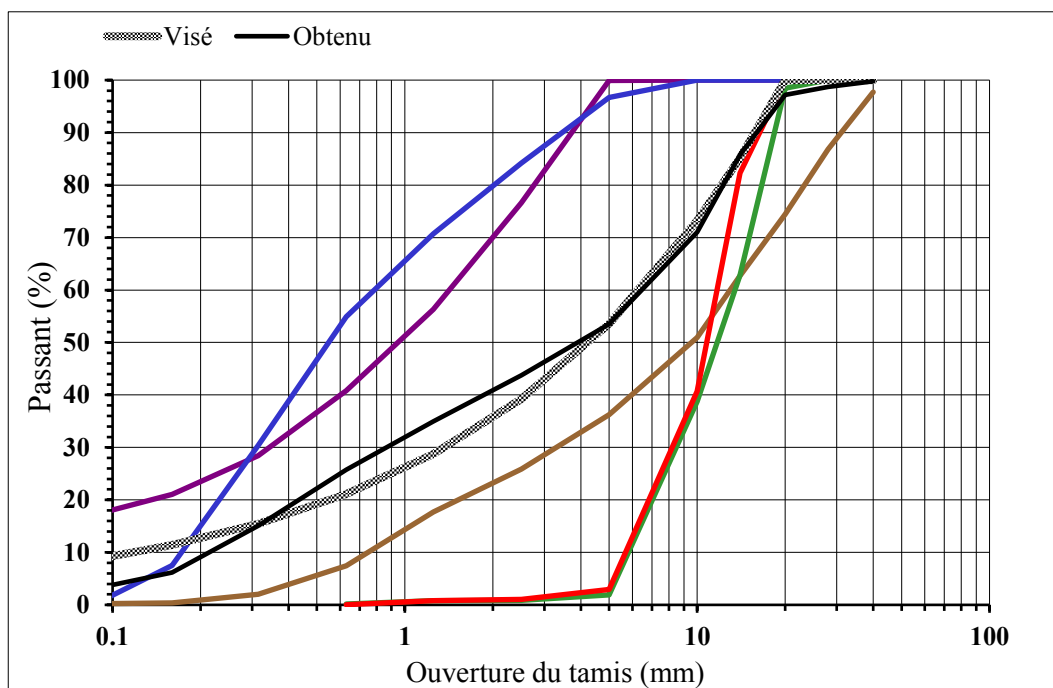


Figure A-7 : Optimisation granulaire à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 75 % GN et 35 % MR-2

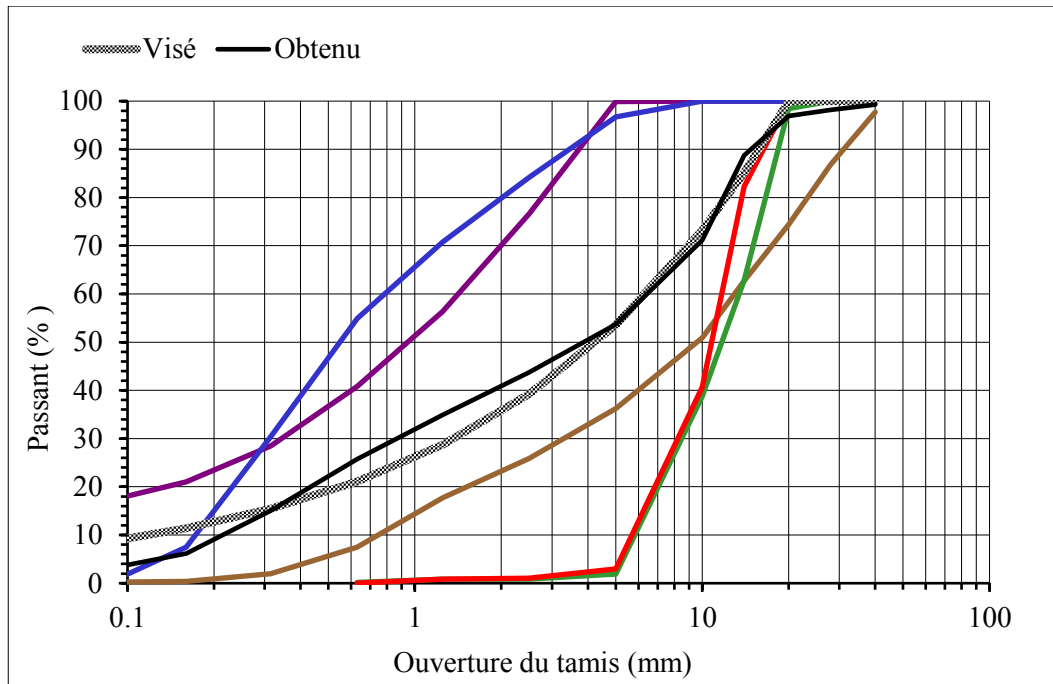


Figure A-8 : Optimisation granulairé à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 82,5 % GN et 17,5 % SMR-2

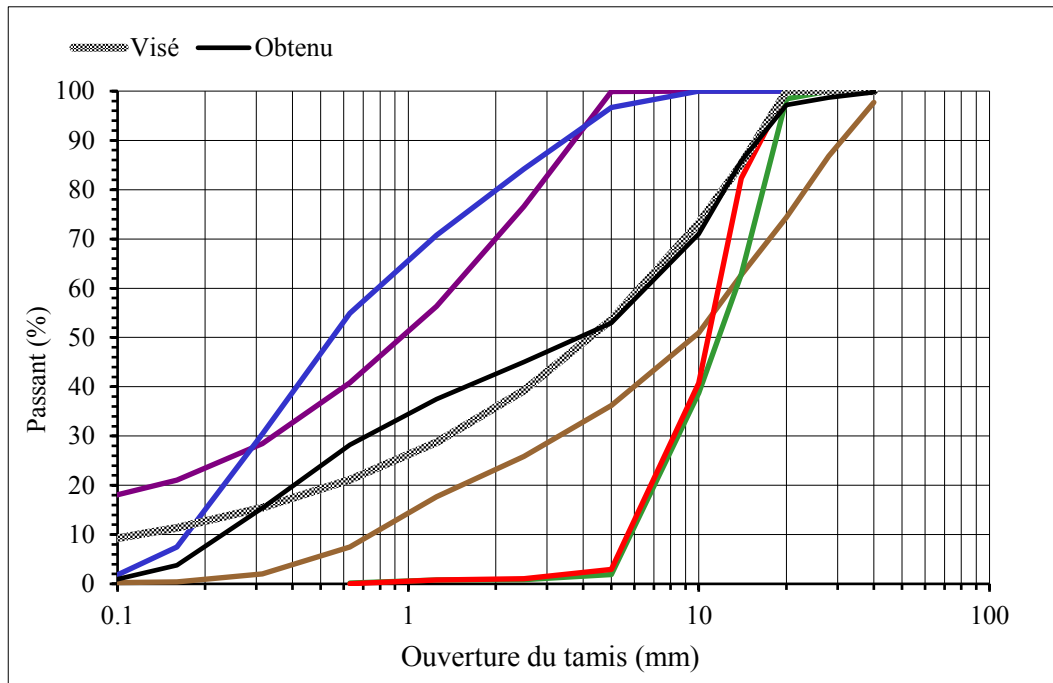


Figure A-9 : Optimisation granulairé à l'aide de la courbe Fuller Thompson, 82,5 % GN et 17,5 % GMR-2

Tableau A-1 : Exigences relatives aux classes d'exposition

EXIGENCES RELATIVES AUX CLASSES D'EXPOSITIONS C,F, N,A et S										
Classe d'exposition	Rapport eau/liants ⁽¹⁾ maximal	Résistance minimale spécifiée à la compression ⁽¹⁾ (MPa)	Catégorie de teneur en air				Type de cure selon les régimes admissibles			Exigences relatives à l'essai de perméabilité aux ions chlorures et âge au moment de l'essai (4)
			Plage des teneurs en air ⁽²⁾ des bétons selon la dimension nominale maximale du gros granulat (%)				Béton ordinaire	BFDAC-1	BFDAC-2	
				10 mm	14-20 mm	28-40 mm				
C-XL	0,40	50 (à 56 jours)	Soumis au gel/dégel	de 6 à 9	de 5 à 8	de 4 à 7	3	3	3	<1000 coulombs dans l'espace de 56 jours
			Non soumis au gel/dégel	de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6				
C-1 ou A-1	0,40	35 (à 28 jours)	Soumis au gel/dégel	de 6 à 9	de 5 à 8	de 4 à 7	2	3	2	< 1500 coulombs dans l'espace de 56 jours
			Non soumis au gel/dégel	de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6				
C-2 ou A-2	0,45	32 (à 28 jours)		de 6 à 9	de 5 à 8	de 4 à 7	2	2	2	
C-3 ou A-3	0,50	30 (à 28 jours)		de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	1	2	2	
C-4 ⁽⁶⁾ ou A-4	0,55	25 (à 28 jours)		de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	1	2	2	
F-1	0,50	30 (à 28 jours)		de 6 à 9	de 5 à 8	de 4 à 7	2	3	2	
F-2	0,55	25 (à 28 jours)	⁽⁷⁾	de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	1	2	2	
N ⁽⁶⁾	Aux fins du calcul structural	Aux fins du calcul structural	Aucune	–	–	–	1	2	2	
S-1	0,40	35 (à 56 jours)		de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	2	3	2	
S-2	0,45	32 (à 56 jours)		de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	2	3	2	
S-3	0,50	30 (à 56 jours)		de 5 à 8	de 4 à 7	de 3 à 6	1	2	2	

Tableau A-2 : Les classes de bétons

Classes	Définitions	Exemples
C-XL	Béton armé exposé aux chlorures ou à d'autres milieux agressifs, soumis ou non au gel/dégel, pour lequel les attentes en matière de durabilité sont plus élevées que celles des classes C-1, A-1 ou S-1.	Pont de la Confédération
C-1	Béton armé exposé aux chlorures, soumis ou non au gel/dégel.	Tabliers de pont, planchers et rampes d'ouvrages de stationnement, parties d'ouvrages maritimes situées à l'intérieur des zones de marnage et d'éclaboussement, ouvrages en béton exposés aux éclaboussements d'eau de mer et piscines d'eau salée
C-2	Béton non armé (c.-à-d. ordinaire) exposé aux chlorures et soumis au gel/dégel.	Planchers de garage (résidentiel), porches, marches, chaussées, trottoirs, bordures et caniveaux.

C-3	Béton constamment submergé, exposé aux chlorures, mais non soumis au gel/dégel.	Parties submergées d'ouvrages maritimes.
C-4	Béton non armé exposé aux chlorures, mais non soumis au gel/dégel.	Dalles sur le sol dans les ouvrages de stationnements intérieurs (commercial).
F-1	Béton soumis au gel/dégel, en condition saturée, mais non exposé aux chlorures.	Bords de piscine, patios, courts de tennis, piscines d'eau douce et installations de régulation des eaux douces.
F-2	Béton soumis au gel/dégel, en condition non saturée, mais non exposé aux chlorures	Murs et poteaux extérieurs.
N	Béton non exposé aux chlorures ni au gel/dégel.	Semelles et dalles, murs et poteaux intérieurs.
A-1	Béton armé exposé à des gaz des fumiers ou d'ensilage fortement agressifs, soumis ou non au gel/dégel. Béton exposé aux vapeurs s'échappant des eaux d'égout municipales ou des eaux industrielles résiduaires, où de l'hydrogène sulfuré peut se former.	Poutres armées, dalles, ouvertures d'accès et poteaux au-dessus des fosses à lisier fermées et de silos, logements clos et conduits partiellement remplis d'eaux résiduaires.
A-2	Béton armé exposé à des gaz et liquides des fumiers et/ou d'ensilage moyennement à fortement agressifs, soumis ou non au gel/dégel.	Murs des structures à lisier, des silos et des réservoirs d'alimentation extérieurs et dalles extérieures pour le fumier égoutté.
A-3	Béton armé constamment submergé, exposé à des gaz et liquides des fumiers et/ou d'ensilage soumis ou non au gel/ dégel. Béton constamment submergé dans des eaux municipales ou industrielles résiduaires.	Murs gouttereaux, poutres, dalles et poteaux intérieurs ; tuyaux d'eaux usées constamment pleins (p. ex., égouts sous pression) et parties submergées d'installations de traitement des eaux usées (ex : fosses septiques).
A-4	Béton non armé modérément exposé à des gaz et liquides des fumiers et/ou d'ensilage modérés, non soumis au gel/dégel.	Dalles intérieures.
S-1	Béton exposé à des sulfates très fortement agressifs (tableaux.2 et 3).	/
S-2	Béton soumis à des sulfates fortement agressifs (tableaux.2 et 3)	/
S-3	Béton exposé à des sulfates moyennement agressifs (tableaux.2 et 3).	/



Figure A-10 : Malaxeur utilisé pour la production des bétons



Figure A-11 : Cône d'Abrams

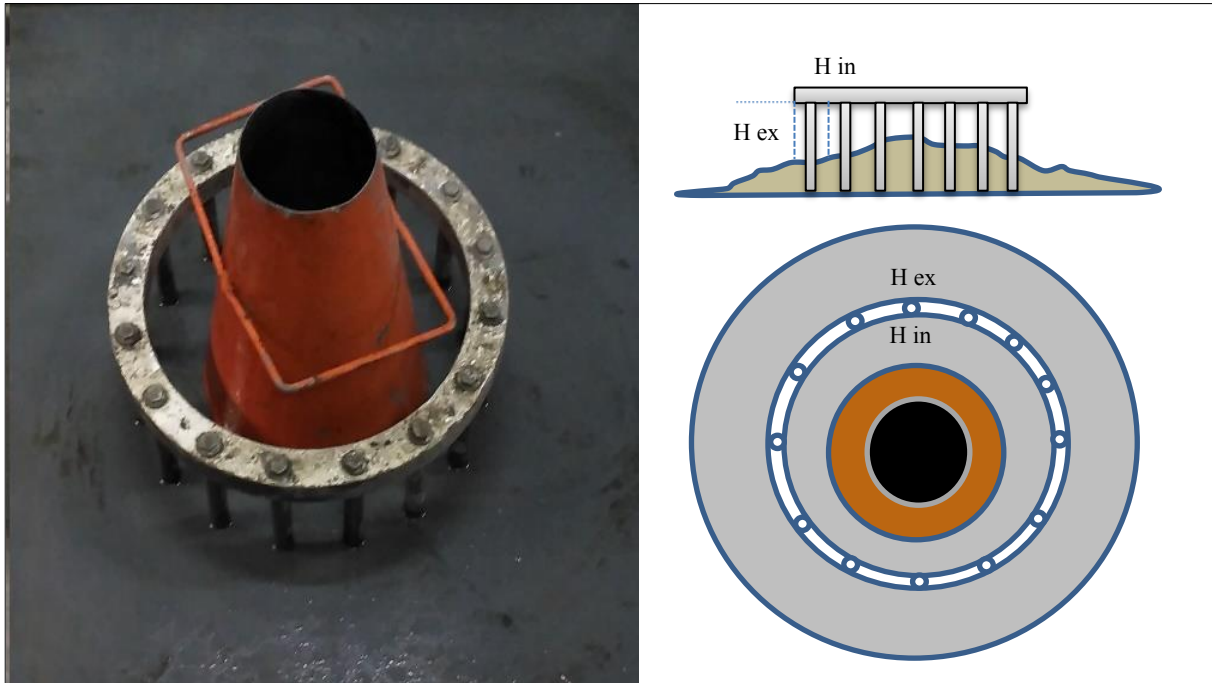


Figure A-12 : Essais de J-Ring vue en plan et en profil



Figure A-13 : Cylindre de béton 100 x 200 mm et surfaceuse



Figure A-14 : Appareil utilisé pour des essais de compression



Figure A-15 : Essais de module d'élasticité sur un cylindre 100 x 200 mm



Figure A-16 : Méthode de mesure du retrait endogène et de séchage



Figure A-17 : Demi-cylindre soumis par un essai de traction indirecte



Figure A-18 : Poutres installées dans un tombeau de gel-dégel



Figure A-19 : Mesure du module dynamique de la poutre soumis à un essai de gel-dégel

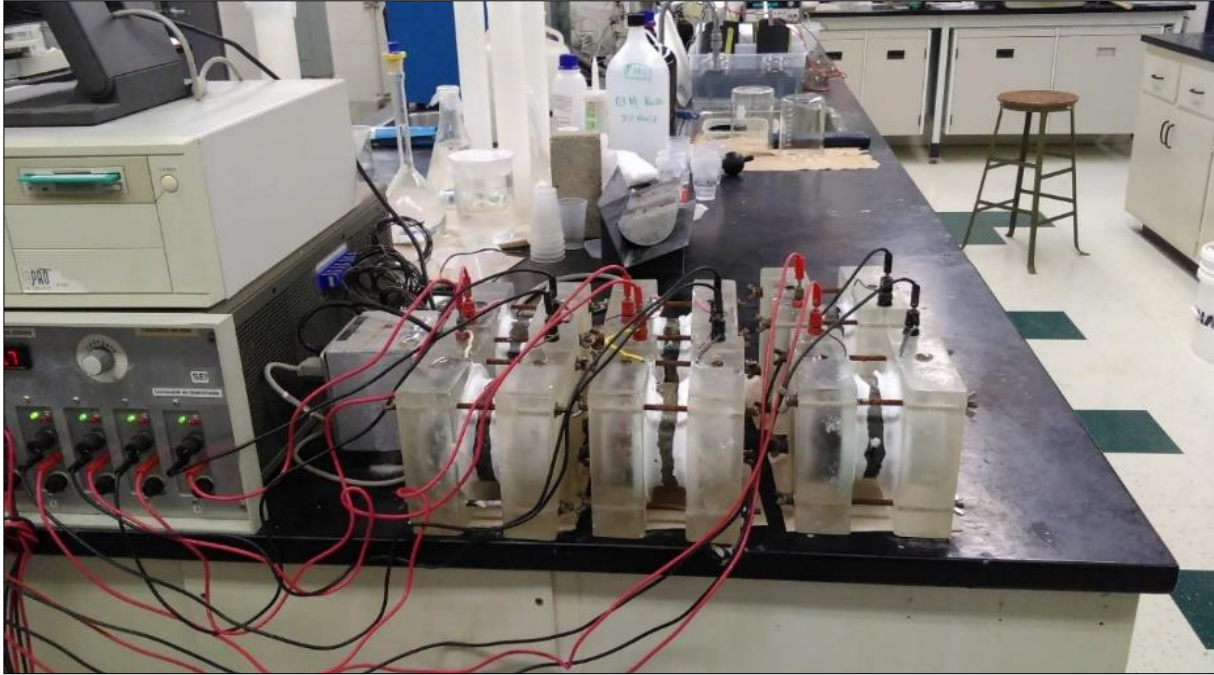


Figure A-19 : Dispositif de mesure de la perméabilité aux ions chlorures selon la norme ASTM.



Figure A-20 : Echantillons pour des essais de compression, traction, flexion, retrait séchage

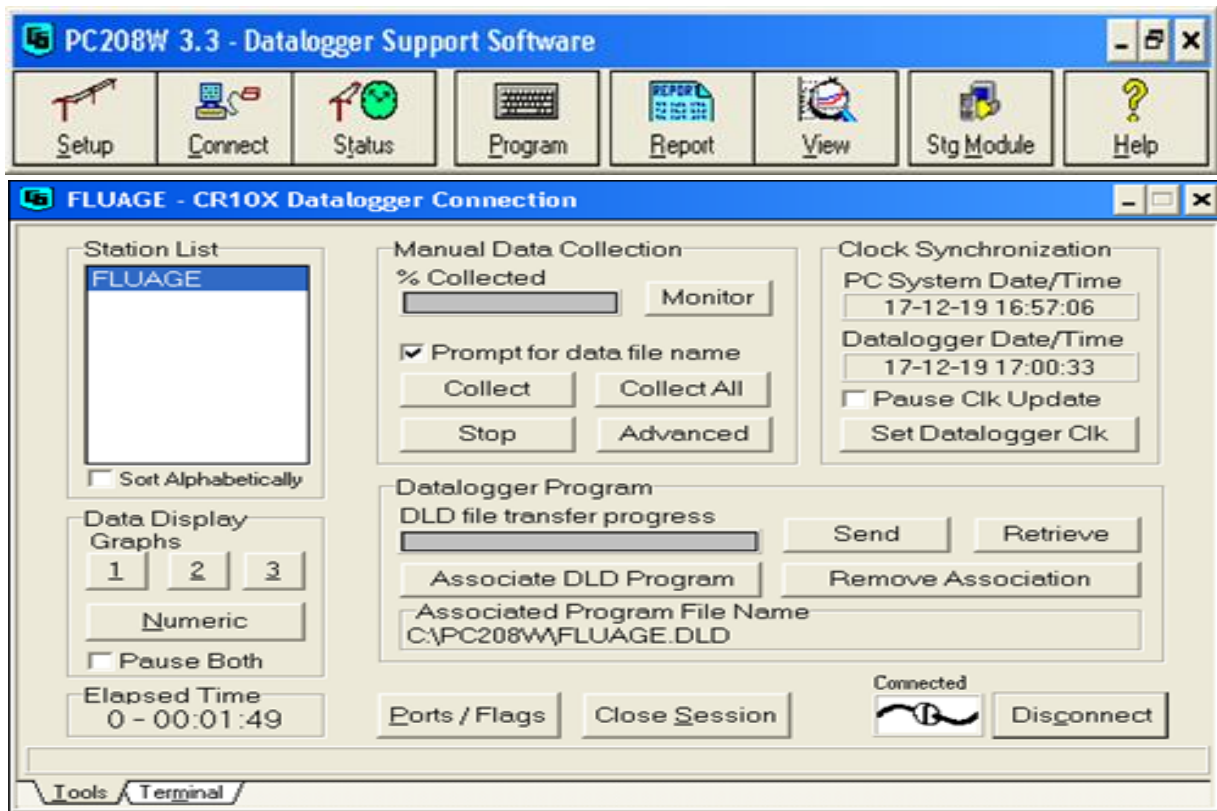


Figure A-21 : Logiciel d'enregistrement des résultats du retrait endogène utilisant la corde vibrante

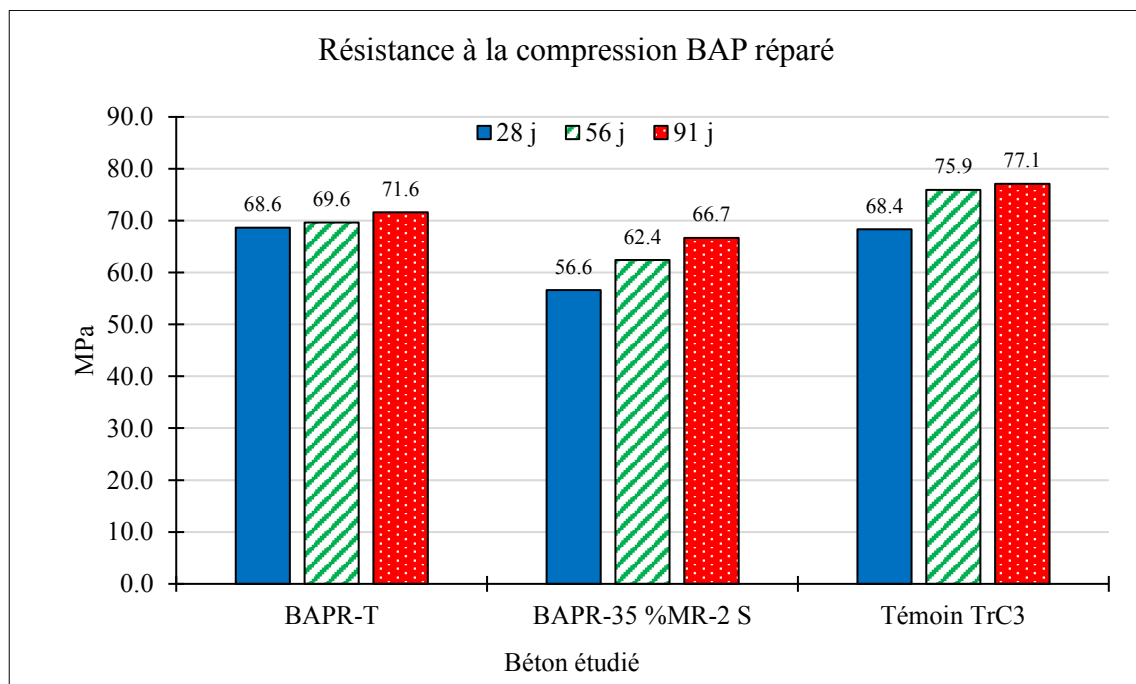


Figure A-22 : Résistance à la compression des bétons réparés

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Abbas, A., Fathifazl, G., Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. et Foo, S. (2008). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, volume 5, numéro 1.
- Aadil Laabous, (2014) Le monde de génie civil, Pratiquer le BTP facilement ; Les caractéristiques principales des granulats Essais-Granulats teneur en eau des granulats ; [<http://forumbtp.blogspot.ca/2014/06/essais-granulats.html>], (L'état de saturation possible granulats poreux). Consulté mars 2017
- Aïtcin P.-C., Acker P. et Neville A. (1998), Les différents types de retrait du béton. Paris, LCPC, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 215.
- Aïtcin, P.-C., NEVILLE, A.M., ACKER, P., (1997) Integrated View of Shrinkage Déformation, *Concrete International*, vol. 19, n°9, p. 35-41
- ACI 237R-07. (2007). Self-consolidating concrete. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00026-6>
- AFGC. (2008). AFGC .RECOMMANDATIONS POUR L'EMPLOI DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS. Association Française de Génie Civil, 64.
- Apaya, I. (2011). Retrait endogène et de séchage des BAP à air entraîné contenant divers composés organiques comme anti-retrait (Master's thesis dissertation).
- Association Béton Québec. (2014). Techno béton L'ÉCAILLAGE DES SURFACES DE BÉTON. La Référence, 3ème édition, 1–4.
- Baofan, C. (2013). Basic mechanical properties and microstructural analysis of recycled concrete. *Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition*, volume 28, numéro 1, p. 104-9.
- Bastien M-J. (2016). Valorisation des granulats de béton recyclé et des granulats de verre recyclé dans les pavages industriels en béton compacté au rouleau. Mémoire de maîtrise
- Bentur A., Igarashi, S. Kovler, K., "Prévention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates", *Cement and Concrete Research*.
- Bentz, D.P., Lura, P., "Mixture Proportioning for Internal Curing", *Concrete International*, 27, 2005, pp35-40.
- Boisvert, M., Bosniak, D., Pierre-Olivier, MDDELCC, & Recyc-Québec. (2015). Gestion des résidus du secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD) Mise en contexte Fiche d'information Gestion des résidus. Recyc-Québec.
- Boulay, V. (2014). Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel.
- Braymand Sandrine. (2013). Bétons De Granulats Recyclés.
- Breugel van, K., Lura. P., "Effect of initial moisture content and particle size distribution of lightweight aggregates on autogenous deformation", *Proceedings of the 2nd international symposium on structural lightweight aggregate concrete*, Kristiansand, Norway, 2000.
- Butler, L., West, J. S. et Tighe, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, volume 41, numéro 10, p. 1037-1049.
- Csa, A. C. D. N. (2011). Béton : Constituants et exécution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton. Csa a23.1-09 / a23.2-09, 9.

- Chakradhara Rao, M., Bhattacharyya, S. K. et Barai, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, volume 44, numéro 1, p. 205-220
- Clikeco (2018) « Les déchets du BTP en France », DÉCHETS DE CHANTIER DE CONSTRUCTION : GESTION ET VALORISATION, <http://www.clikeco.com/P-57-88-F1-dechets-de-chantier-de-construction-gestion-et-valorisation.html>, consulté mai 2017
- de Juan, M. S. et Gutierrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction & Building Materials*, volume 23, numéro 2, p. 872-7
- Detriche, C.H., (1992) Chapitre 4 La maîtrise de la fissuration précoce : condition de la durabilité des ouvrages, *La durabilité des Bétons*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p.107-128., ISBN 2-85978-184-6.
- Djerbi, T. (2012). Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach, *Construction and Building Materials*, 27 1, 112– 116.
- Douara. T.H, BENHOUNA. M, NEZERGUI [2009], « caractéristiques physiques et chimiques des granulats recyclés et granulats naturels », SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, 12-14 Octobre
- Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M. A., Serna, P., & Castaño Tabares, J. O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2545–2553.
- Étienne LEPESQUEUX. (2011). COMPOURTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS PRÉPARÉS AVEC DES GRANULATS LÉGERS.
- Exteberria M., Vásquez E. & Mari A. R. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, (37) 735–742
- Fathifazl, G., Ghani Razaqpur, A., Burkan Isgor, O., Abbas, A., Fournier, B., & Foo, S. (2011). Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 33(10), 1026–1037.
- François Modjabi-Sangnier. (2010). APPROCHE QUANTITATIVE DE LA NOTION DE COMPATIBILITÉ DES BÉTONS DE RÉPARATION AUTOPLAÇANTS.
- Fantous T. (2015), Valorisation de l'utilisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton destiné à la construction des pavages bicouche : analyse comparative et validation sur code de calcul abaqus
- Fabrigat S. (2012), Actu environnement, déchet, projet RecyBéton, <https://www.actu-environnement.com/ae/news/recyclage-dechets-batiment-beton-granulats-14781.php4> (photo de déchet de démolition), consulté mai 2017
- Guide de béton, <http://www.guidebeton.com/beton-autoplacant#form-header>, Consulté juin 2017
- Grondin, A. (2011). Valorisation des granulats recyclés de béton : Etude des caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de granulats recyclés de béton, 81.
- Gomez-Soberon M. V. (2002). Creep of Concrete with Substitution of Normal Aggregate by Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, (209) 461-474
- Henkensiefken, R., Nantung, T., Weiss W.J., "Reducing restrained shrinkage cracking in concrete: examining the behavior of self-curing concrete made using different volumes of saturated lightweight aggregate", National concrete bridge conference, St. Louis, MO, 2008.
- Houria, M., & Nourredine, A. (2011). Les granulats recyclés humidifiés : comportements des

- bétons frais et durcis. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 401,410.
- Limbachiya M. C., Leelawat T. & Dhir R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high strength concrete. *Materials and Structures*. (33) 574–580
- Loser, R., Leemann, A., "Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self- compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete", *Materials and Structures*, 42, 2009, pp71 82.
- Luc Bédard. (2016). ABQ, Nouveautés dans le monde du béton prêt à l ' emploi, 19eme cong.
- Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R. & Kawai K. (2004). Flexural properties of reinforced recycled beams. In *Proceedings of international RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*. (1) 525–535
- Moniz, C., Pierre, P., Pleau, R., & Juneau, S. (2013). Détermination de la performance en laboratoire de matériaux recyclés utilisés en fondation routière Projet R672.1.
- Naël-Redolfi, J. (2016). Absorption d ' eau des granulats poreux : mesure et conséquences sur la formulation des mortiers et des bétons. PhD Thesis, Université Paris-Est.
- NQ 2590-600/2002. (2002). Granulats - Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobé bitumineux et de briques - Classification et caractéristiques.
- Okamura Hajime, Masahiro Ouchi. Self-compacting concrete. 2003 ;1(1):5–15
- Pollet, V., & Jacobs, J. (2004). La cure des bétons, NORMALISATION – RÉGLEMENTATION – CERTIFICATION, 1–5.
- Pierre-Claude Aïtcin, Frédéric Génèreaux, Guy Jolicoeur, Yolette Maurice, (2012), Technologie des granulats ; 3^{ème} édition
- Piécard J., & Dieryck V. (2004). Le retrait au jeune âge des bétons spéciaux, 1–4.
- Tam, V. W. Y. et Tam, C. M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, (42) no 10, 3592 3602.
- Tahar, Z. elabidine. (2015). Etude de l'influence des granulats recyclés sur le comportement des MBE.
- Tavakoli M. & Soroushian P. (1996). Strengths of aggregate concrete made using field demolished concrete as aggregate. *ACI Materials Journal*. (2) no 93, 182–190
- Thiery, M., Nicolas, R., Guillaume, H., & Patrick, B. (2011). concassés de matériaux cimentaires Modélisation et validation expérimentale Développement Durable : un challenge pour l'industrie cimentière.
- Sagoe-Crentsil K. K., Brown T. & Taylor A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*. (31) 701–712.
- Steven H, Kosmaka, Beatrix Kerkhoff, R. Douglas Hooton et Richard J.McGrath (2011) Dosage et contrôle des mélanges de béton, Manuel d'application, méthodes et matériaux ; 8^{ème} Edition.
- Wen H., McLean D., Boyle S., Spry T. & Mjelde D. (2014), Evaluation of recycled concrete as aggregate in new concrete pavements. 63-66.
- Wolters T. (2010). Interactions avec l'environnement de géopolymères à base de laitier, 75.
- Yadav, S., & Pathak, S. (2009). Use of recycled concrete aggregate in making concrete-an overview. 34th Conference on our World in Concrete & Structures, pp. 16-18.